

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Karlo Zidarić

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Doc. dr. sc. Ivica Garašić, mag. Ing.

Student:

Karlo Zidarić

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svojim mentorima doc. dr. sc. Ivici Garašiću te dr. sc. Maji Jurica na stručnom vođenju tijekom izrade diplomskog rada. Veliko hvala i svima s Katedre za zavarene konstrukcije na pomoći u izradi eksperimentalnoga dijela rada.

Srdačno zahvaljujem svojim roditeljima na podršci i pomoći tijekom studija.

Karlo Zidarić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student:

KARLO ZIDARIĆ

Mat. Br.: **0035176012**

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**PRIMJENA PRAŠKOM PUNJENE ŽICE ZA ZAVARIVANJE
RAZNORODNIH ČELIKA**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**APPLICATION OF FLUX CORED WIRE FOR WELDING OF
DISSIMILAR STEELS**

Opis zadatka:

Proučiti probleme koji se javljaju pri zavarivanju spojeva nelegiranih i visokolegiranih nehrđajućih austenitnih čelika. Analizirati zavarljivost s posebnim naglaskom na metalurške procese i stvaranje optimalne mikrostrukture u metalu zavara i zoni utjecaja topline. Obrazložiti utjecaj ugljika na korozijsku postojanost i mehanička svojstva zavarenog spoja raznorodnih čelika. Navesti značajke postupka zavarivanja praškom punjenim žicama te objasniti metode odabira dodatnih materijala i plinova ovisno o vrsti osnovnog materijala.

U eksperimentalnom dijelu potrebno je za kombinaciju nelegiranog konstrukcijskog čelika i visokolegiranog nehrđajućeg austenitnog čelika odgovarajuće debljine odrediti tehnologiju zavarivanja uz primjenu praškom punjene žice. Obrazložiti odabir dodatnog materijala i zaštitnog plina. Zavarivanje provesti na uzorcima kutnog i sučeljenog spoja. Nakon zavarivanja odrediti potrebna razorna i nerazorna ispitivanja te ocijeniti svojstva zavarenog spoja. Načiniti komparativnu analizu u odnosu na primjenu pune žice i odrediti smjernice za primjenu u proizvodnji.

Zadatak zadan:

5. svibnja 2016.

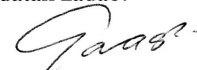
Rok predaje rada:

7. srpnja 2016.

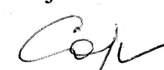
Predviđeni datum obrane:

13., 14. i 15. srpnja 2016.

Zadatak zdao:


Doc. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Franjo Čajner

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	V
POPIS KRATICA	VI
POPIS OZNAKA	VIII
SAŽETAK	IX
ABSTRACT	X
1 UVOD	1
2 ZAVARIVANJE NELEGIRANIH I VISOKOLEGIRANIH ČELIKA	2
2.1 Nelegirani čelici	2
2.2 Visokolegirani čelici	4
2.2.1 Martenzitni čelici	6
2.2.2 Feritni čelici	7
2.2.3 Austenitni čelici	8
3 ZAVARIVANJE PRAŠKOM PUNJENOM ŽICOM	10
3.1 Praškom punjene žice	13
3.1.1 Podjela praškom punjenih žica prema načinu izrade	14
3.1.2 Samozaštitne praškom punjene žice	16
3.1.3 Žice punjene metalnim praškom	16
3.1.4 Punjene žice s sastavom jezgre pretežito od mineralnih tvari	17
3.2 Parametri zavarivanja i tehnika rada	18
3.3 Zaštitni plinovi	19
4 ZAVARIVANJE RAZNORODNIH ČELIKA	20
4.1 Podjela zavarenih konstrukcija iz raznorodnih čelika	22
4.2 Teorijske osnove zavarivanja raznorodnih čelika	24
4.2.1 Stupanj protaljivanja (miješanja) i kemijska raznorodnost	24
4.2.2 Strukturna raznorodnost materijala zavarenih spojeva raznorodnih čelika	27
4.2.3 Schaefflerov dijagram	27
4.2.4 Izbor postupka zavarivanja	32

4.2.5	Dodatni materijal.....	33
4.3	Problemi kod zavarivanja raznorodnih čelika.....	34
4.3.1	Difuzijski procesi	34
4.3.2	Zaostala naprezanja i deformacije zavarenih spojeva iz raznorodnih čelika.....	37
4.4	Zavarivanje platiranih materijala	39
5	EKSPERIMENTALNI DIO	40
5.1	Oprema i materijali korišteni za izradu eksperimentalnog dijela rada.....	40
5.1.1	Izvor struje	40
5.1.2	Specifikacija osnovnog materijala - nelegirani čelik	42
5.1.3	Specifikacija osnovnog materijala - visokolegirani čelik.....	43
5.1.4	Dodatni materijal.....	44
5.1.5	Zaštitni plin	45
5.2	Zavarivanje uzoraka	46
5.3	Nerazorno ispitivanje uzoraka penetrantima	51
5.4	Nerazorno ispitivanje	53
5.5	Ispitivanje mehaničkih svojstva zavarenih spojeva	57
5.5.1	Izrada epruveta za statički vlačni pokus.....	58
5.5.2	Statički vlačni pokus	60
5.5.3	Ispitivanje savijanjem.....	63
5.6	Makro analiza i geometrija zavora	66
5.7	Mikrostrukture zavarenih spojeva.....	70
6	ZAKLJUČAK	75
7	LITERATURA.....	77
	PRILOZI	79

POPIS SLIKA

Slika 1. Mikrostruktura feritnih čelika [7]	7
Slika 2. MAG zavarivanje s praškom punjenom žicom [12]	11
Slika 3. Zavarivanje samozaštitnom praškom punjenom žicama [12]	12
Slika 4. Razlike u prijenosu materijala i izgledu rastaljene zone; a) puna žica; b) praškom punjena žica [13]	14
Slika 5. Praškom punjene žice prema načinu izrade; a) žica s preklopnim spojem; b) šavna žica (sučeljeni spoj); c) bešavna žica [13]	15
Slika 6. Utjecaj dužine električnog luka na količinu rastaljenog dodatnog materijala [13]	18
Slika 7. Osnovni način podjele zavarenih konstrukcija iz raznorodnih spojeva [15]	22
Slika 8. Prikaz zone taline metala zavara [15]	24
Slika 9. Shematski prikaz kemijskog sastava u zonama miješanja metala zavara i osnovnog materijala [15]	25
Slika 10. Schaefflerov dijagram [14]	28
Slika 11. Primjena Schaefflerovog strukturnog dijagrama pri određivanju kemijske i strukturne heterogenosti slojeva zavara [14]	30
Slika 12. Faktor f koji ovisi o postotku Fe u metalu zavara [20]	32
Slika 13. Difuzija ugljika prilikom zavarivanja ugljičnog čelika s austenitnim čelikom [21]	35
Slika 14. Proces difuzije kod spajanja ugljičnog osnovnog čelika s austenitni dodatnim materijalom [18]	35
Slika 15. Utjecaj sadržaja kroma u ugljičnom čeliku na širinu razugljičenog sloja [17]	36
Slika 16. Izvor struje ESS E4-4200	41
Slika 17. Vodeći kotači za praškom punjenu žicu	44
Slika 18. Provjera protoka plina	45
Slika 19. Priprema i dimenzije uzorka, kutnog spoja	46
Slika 20. Priprema i dimenzije uzorka, čeonog spoja	47
Slika 21. Zavarivanje uzoraka kutnog spoja	49
Slika 22. Zavarivanje korijen zavara sučeljenog spoja	50
Slika 23. Uzorci kutnog spoja nakon ispitivanja penetrantima, gornji - A, donji - C	52
Slika 24. Uzorci sučeljenog spoja nakon ispitivanja penetrantima, gornji - B, donji - D	52
Slika 25. Uzorak pripremljen za rendgensko snimanje X zrakama	54
Slika 26. Radiogram Uzorka B	55
Slika 27. Radiogram Uzorka D	56

Slika 28. Prikaz mjesta vađenja uzoraka za mehanička ispitivanja [27]	57
Slika 29. Rezanje uzoraka - gore, glodanje epruveta - dolje	58
Slika 30. Dimenzije epruveta, statičko vlačni pokus - gornja epruveta, savijanje - donja epruveta.....	59
Slika 31. Kidalica WPM EU 40 MOD	60
Slika 32. Shema ispitivanja savijanjem prema HRN EN ISO 5173:2010 [28]	63
Slika 33. Stroj za poliranje izrezanih ispitnih uzoraka	66
Slika 34. Mjerene veličine zavara	67
Slika 35. Uređaj za mjerenje feritnog broja	72
Slika 36. Grafički prikaz udjela ferita u zonama zavara.....	73
Slika 37. Grafički prikaz sadržaja ferita za pojedinog stanja pokusa.....	74

POPIS TABLICA

Tablica 1. Temperature predgrijavanja (T_o) ovisno o sadržaju ugljika [2].....	3
Tablica 2. Fizikalna svojstva nelegiranih čelika i glavnih grupa visokolegiranih čelika [6]	5
Tablica 3. Stupanj miješanja s obzirom prema vrsti spoja i tehnologije zavarivanja [15]	26
Tablica 4. Približne vrijednosti feritnog broja (FN) za pojedine metale zavara [14].....	30
Tablica 5. Stupnjevi miješanja za pojedine postupke zavarivanja taljenjem [14]	33
Tablica 6. Svojstva različitih vrsta čelika [14].....	37
Tablica 7. Tehničke specifikacije izvora struje za zavarivanje ESS E4-4200 [23]	40
Tablica 8. Mehanička svojstva čelika S355J2 + N [24]	42
Tablica 9. Mehanička svojstva osnovnog materijala 1.4301 X5CrNi18 - 10 [25]	43
Tablica 10. Kemijski sastav čelika 1.4301 X5CrNi18 - 10 [25].....	43
Tablica 11. Mehanička svojstva dodatnog materijala prema EN 10204-3.1 [26].....	44
Tablica 12. Kemijski sastav dodatnog materijala [26]	45
Tablica 13. Parametri zavarivanja uzoraka kutnog spoja	48
Tablica 14. Parametri zavarivanja uzoraka sučeljenog spoja	48
Tablica 15. Epruvete nakon provedbe statičko vlačnog pokusa	61
Tablica 16. Rezultati statičkog vlačnog pokusa.....	61
Tablica 17. Rezultati ispitivanja savijanjem Uzorka B	64
Tablica 18. Rezultati ispitivanja savijanjem Uzorka D	65
Tablica 19. Oznake mjerne veličine zavara	67
Tablica 20. Makroizbrusci uzoraka kutnih spojeva.....	68
Tablica 21. Makroizbrusci uzoraka sučeljenog spoja.....	69
Tablica 22. Mikrostruktura sučeljenog uzorka B.....	70
Tablica 23. Mikrostrukture sučeljenog uzorka D.....	71
Tablica 24. Izmjerene vrijednosti feritnog broja.....	73

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
A	Austenit
Al	Aluminij
C	Ugljik
Co	Kobalt
CO ₂	Ugljikov dioksid
Cr	Krom
Cu	Bakar
EPP	Elektrolučno zavarivanje pod zaštitom praška
F	Ferit
Fe	Željezo
FN	Feritni broj
Li	Litij
M	Martenzit
MAG	eng. Metal active gas
MIG	Eng. Metal inert gas
Mn	Mangan
Mo	Molibden
N	Dušik
Nb	Niobij
Ni	Nikal
P	Fosfor
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
S	Sumpor
Si	Silicij
Ta	Tantal
Ti	Titan
TIG	eng. Tungsten Inert Gas
V	Vanadij
W	Volfram
ZT	Zona taljenja

ZUT

Zona utjecaja topline

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
a	mm	Visina zavora
c	$\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$	Specifični toplinski kapacitet
E	GPa	Vlačni modul elastičnosti
K	mm	Slobodni kraj žice
I	A	Jakost struje
m	%	Udio nataljenog materijala u zavoru
n	%	Udio protaljenog osnovnog materijala u ukupnoj masi zavora
R _m	N/mm^2	Vlačna čvrstoća
R _{p0,2}	N/mm^2	Granica razvlačenja
T _o	°C	Temperatura predgrijavanja
U	V	Napon
V _z	cm/min.	Brzina zavarivanja
x	%	Maseni udio
X ₁	mm	Širina razugljenog sloja
x _{om1}	%	Maseni udio kemijskog elementa „1“ u osnovnom materijalu
x _{om2}	%	Maseni udio kemijskog elementa „2“ u osnovnom materijalu
x _{z1}	%	Maseni udio kemijskog elementa „1“ u dodatnom materijalu
x _{z2}	%	Maseni udio kemijskog elementa „2“ u dodatnom materijalu
Q	kJ/cm	Unos topline
α	10^{-6}K^{-1}	Koeficijent linearnog istezanja
γ		Stupanj protaljivanja
δ	mm	Udaljenost od granice staljivanja
δ_1	mm	Širina zone kupke zavora
δ_2	mm	Širina zone kupke zavora
η		Stupanj iskorištenja pojedinog postupka zavarivanja
λ	$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$	Koeficijent toplinske vodljivosti
ρ	kg m^{-3}	Gustoća
Ω	$10^{-6}\Omega\text{m}$	Specifični električni otpor

SAŽETAK

Tema ovog diplomskog rada je zavarivanje raznorodnih čelika te se dijeli na teoretski i eksperimentalni dio.

U prvom poglavlju ukratko je opisano zavarivanje nelegiranih i visokolegiranih čelika. Drugo poglavlje opisuje zavarivanje praškom punjenom žicom te primjenu istog u zavarivanju raznorodnih čelika. Dane su prednosti i nedostaci zavarivanja praškom punjenom žicom kao i vrste praškom punjenih žica, tehnika rada te zaštitni plinovi. Zavarivanje raznorodnih spojeva, teoretske osnove istih kao i podjela dati su u trećem poglavlju. U teoretskim osnovama je opisan stupanj protaljivanja, strukturna raznorodnost, Schaefflerov dijagram te na kraju problemi kod zavarivanja raznorodnih čelika.

U eksperimentalnom dijelu MAG postupkom praškom punjenom žicom zavareni su ispitni uzorci sučeljenog i kutnog spoja ugljičnog čelika s visokolegiranim čelikom te različitim vrstama zaštitnih plinova. Na uzorcima su napravljena razorna i nerazorna ispitivanja, ispitana su mehanička svojstva zavarenih spojeva, izmjereni sadržaj ferita u pojedinom metalu zavara te je napravljena makro i mikro analiza makroizbrusaka.

Ključne riječi: Zavarivanje, raznorodni čelici, raznorodni spoj, praškom punjene žice

ABSTRACT

The theme of this diploma thesis is welding of dissimilar steels and is divided into theoretical and experimental part.

In the first chapter the welding of non-alloyed steels and high-alloyed steels is summarized. The second chapter describes the welding with flux cored wire and the application of the same in the welding of dissimilar steels. The advantages and disadvantages of welding with flux cored wire are given as well as the types of flux cored wires, work techniques and shielding gases. Welding of dissimilar joints, their theoretical basis, the melting stage, the structural diversity, Schaeffler's diagram and finally the problems in welding dissimilar steels are described.

In the experimental part with the MAG flux cored wire welding procedure test samples of butt and angular joints of carbon steel with high-alloyed steels are welded with various types of shielding gases. The samples are subjected to destructive and non-destructive testing, mechanical properties of welded joints are tested, the ferrite content in each of the weld metal is measured and the macro and micro analysis of macrosandings are made.

Key words: Welding, dissimilar steels, dissimilar joints, flux cored wires

1 UVOD

Zbog potražnje industrija kao što su kemijska, industrija za preradu nafte i nuklearna, danas se sve veći broj istraživača bavi zavarivanjem raznorodnih čelika. Neke od tih industrija, primarno industrija za preradu nafte i nuklearna bez primjene različitih kombinacija čelika i ostalih materijala ne bi mogle funkcionirati. Budući da je zavarivanje osnovni način spajanja javlja se problem zavarivanja raznorodnih čelika. Već dugi niz godina tim se problemom bave mnoge tvornice.

Praškom punjene žice kod zavarivanja primjenjuje se u skoro svim granama industrije. Postoji zavarivanje praškom punjenom žicom s zaštitnim plinom i bez, što se odnosi na samozaštitnu praškom punjenu žicu. Takva vrsta žice se sastoji od plašta i jezgre te jezgra unutar žice, odnosno prašak ima sličnu ulogu kao obloga kod elektrode za REL zavarivanje. Jezgre u navedenim žicama mogu biti od metalnog, rutilnog, bazičnog te mješovitog praška. Parametri kod zavarivanja praškom punjenih žica za dobivanje kvalitetnih zavara su vrlo bitni, no ne smije se zanemariti ni važnost unosa topline koji ovisi o duljini električnog luka i tehnici rada.

Problemi koji se javljaju kod ovakvog zavarivanja su difuzija ugljika, nastanak zaostalih naprezanja zbog samog zavarivanja koje smanjuju mehanička svojstva i sigurnost spojeva te u nekim slučajevima može doći i do pukotina. Kako bi smo to spriječili važno je prilikom svakog zavarivanja dobro proučiti svojstva izabranog osnovnog i dodatnog materijala, tehnike rada i sam postupak zavarivanja. Posebnu pažnju potrebno je obratiti na stupanj protaljivanja ili penetracije koje mora biti minimalno te je vrlo važno dobiti dobro miješanje osnovnih materijala s dodatnim. Ukoliko se osnovni materijal dobro pomiješa s dodatnim, dolazi do miješanja svojstava dvaju materijala.

2 ZAVARIVANJE NELEGIRANIH I VISOKOLEGIRANIH ČELIKA

2.1 Nelegirani čelici

Najvažniji prateći kemijski element kod nelegiranih čelika je ugljik. Njegov sadržaj je od 0,1 % C do 0,6 % C. Ostali prateći elementi su uglavnom: 0,5 % Si, 0,8 % Mn, 0,05 % S, 0,05 % P, 0,1 % Al, 0,1 % Ti i 0,25 % Cu. Niskolegirani čelici sadrže od 5 % legiranih elemenata (Ni, Cr, Mo, V i ostali) [1].

U čeličani se mogu proizvesti [1]:

- Neumireni čelik, bez dezoksidacije s nepoželjnim segregacijama, ali mekanom površinom što je pogodno za duboko vučenje,
- Poluumireni čelik s djelomičnom dezoksidacijom, ima manje izražene segregacije,
- Umireni čelik, umiruju se većim količinama dezoksidansa. Neki od dezoksidansa su: Si, Mn, Al,
- Posebno umireni, takvi čelici sadrže i Al kao dezoksidans te sadržaj mora biti veći od 0,02 %.. Al_2O_3 služi kao tvorca klica kristalizacije pa se dobiva sitno zrnata mikrostruktura koja rezultira visokom udarnom žilavošću te otpornošću na starenje.

Problemi koji se javljaju kod zavarivanja nelegiranih čelika su: pukotine, poroznost, starenje i krhkost materijala zbog visokog sadržaja sumpora te fosfora u samoj leguri nehrđajućih čelika. Za sadržaj sumpora i fosfora je vrlo bitan način proizvodnje samog čelika. Zbog toga umireniji čelici imaju bolju zavarljivost, ali su i skuplji. Mjere pomoću kojih se postižu kvalitetniji zavareni spojevi su predgrijavanje osnovnog materijala, zavarivanje s većim unosom topline, primjena bazičnih elektroda, optimalno oblikovanje konstrukcije te popuštanje zaostalih naprezanja.

Kod predgrijavanja čelika vrlo je bitan sadržaj ugljika u leguri i ostalih elemenata, debljina stijenke, napetosti i sadržaj difuzijskog vodika. Predgrijavanjem se postiže smanjenje brzine hlađenja zone utjecaja temperature i zone taljenja, izlazak difuzijskog vodika te se smanjuju zaostala naprezanja. Predgrijavanje čelika se odnosi na zagrijavanje mjesta zavarivanja iznad temperature okoliša te održavanjem temperature prilikom zavarivanja. U Tablici 1. su prikazane određene temperature predgrijavanja ovisne o sadržaju ugljika. [1, 2].

Tablica 1. Temperature predgrijavanja (T_o) ovisno o sadržaju ugljika [2]

Sadržaj ugljika, mas. %	Temperatura predgrijavanja (T_o), °C
0,2 – 0,3	100 – 150
0,3 – 0,45	150 – 275
0,45 – 0,80	275 - 425

Primjenom elektroda s bazičnom oblogom smanjene su mogućnosti pojave pukotina [2].

Kod zavarivanja debljih materijala se primjenjuje žarenje nakon zavarivanja na temperaturama od 550 °C do 650 °C u vremenu od 2 minute po jednom milimetru debljine osnovnog materijala. Time se smanjuju troosne napetosti i sklonost krhkom lomu koji su prisutni u materijalu nakon zavarivanja [2].

2.2 Visokolegirani čelici

Prvi počeci visokolegiranih čelika bili su početkom 20. stoljeća. Patentirao ih je poznati proizvođač čelika Krupp 1912. godine. Ti materijali su u konstantom razvoju sve do danas te su danas već jako usavršeni. Najveći porast visokolegiranih čelika je u zadnjih 40 godina zbog uvođenja toplog i hladnog valjanja, široke upotrebe kontinuiranog lijevanja te uvođenje sekundarne metalurgije. Proizvodnja visokolegiranih čelika u zadnjih 25 godina se udvostručila, jedino još aluminij pokazuje sličan rast [3, 4].

Čelici koji posjeduju sadržaj legirnih elemenata veći od 5 % spadaju u skupinu visokolegiranih čelika. Visokolegirane čelike može se podijeliti prema strukturi materijala dobivenoj hlađenjem na zraku nakon visoko temperaturnog zagrijavanja [5]:

- martenzitni čelici (meko martenzitni),
- martenzitno - feritni čelici,
- austenitno - martenzitni čelici,
- austenitno - feritni čelici (duplex),
- feritni čelici (super – feritni),
- austenitni čelici (super – austenitni).

Novije skupine čelika su super i meko martenzitni čelici jer su im posebnim legiranjem znatno poboljšana svojstva. S obzirom na primjenu visokolegirani čelici se dijele na korozijski postojane, vatrootporne itd. Prema sustavima legiranja dijele se na krom čelike, krom-nikal čelike, krom-mangan čelike itd. Svaka od navedenih skupa ima svoje probleme kod zavarivanja i eksploataciji zavarenih spojeva. Kod same zavarljivosti visokolegiranih čelika važna su i njihova fizikalna svojstva koja utječu na njihovo ponašanje prilikom zavarivanja, a to su toplinska vodljivost, električni otpor, temperaturno rastezanje i modul elastičnosti. U tablici 2. su prikazana fizikalna svojstva pojedinih grupa visokolegiranih čelika [5, 6].

Tablica 2. Fizikalna svojstva nelegiranih čelika i glavnih grupa visokolegiranih čelika [6]

VRSTA ČELIKA		Fizikalna svojstva				
		α $10^{-6} \times K^{-1}$ (100 °C – 500 °C)	λ W/(m x K) (20 °C)	Ω $\Omega \times mm^2/m$ (20 °C)	E kN/mm ² (20 °C)	Magne- tičnost
VISOKOLEGIRANI ČELICI	Feritni	10,5 – 12,0	29	0,60	210	+
	Martenzitni	10,5 – 12,0	30	0,60	210	+
	Austenitni	16 – 18	15	0,73	200	-
	Austenitno- -feritni (duplex)	12,5 – 13 (do 300 °C)	14	0,79	206	+
Nelegirani čelici		13	47	0,15	205	+

2.2.1 Martenzitni čelici

Martenzitni čelici su legirani s 13 % do 18 % kroma, imaju povišeni udio ugljika (0,2 % - 1,0 %) te mogu sadržavati 2,5 % nikla i 1,3 % molibdena. Zbog najvećeg udjela kroma se i nazivaju martenzitni kromni čelici. Dije se u dvije skupine, a to su konstrukcijski čelici i alatni čelici. Konstrukcijski čelici sadrže do 0,25 % C te se poboljšavaju. Kod njih se posebna pažnja usmjerava na otpornost prema koroziji koju dobivaju nakon poboljšavanja jer u meko žarenom stanju imaju puno manju. Alatni čelici sadrže više od 0,3 % C i potrebno ih je popuštati nakon kaljenja. Kod alatnih čelika postoji dodatni zahtjev prema abrazivskom trošenju. Njihova korozijska postojanost je nešto niža zbog dvofazne mikrostrukture koju posjeduju (martenzit + karbidi) [3,7].

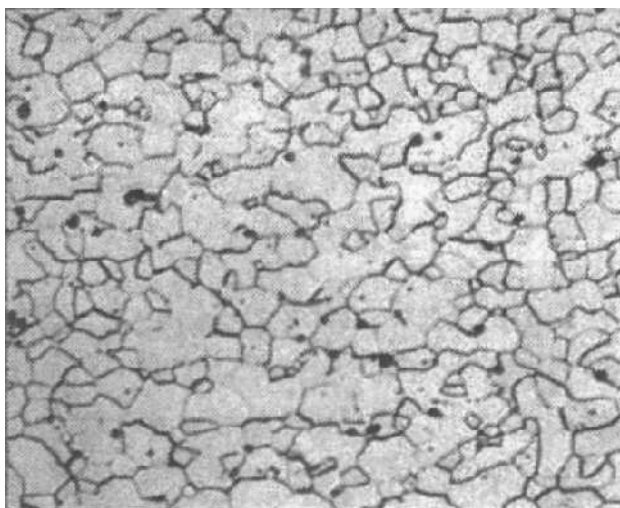
Kod zavarivanja martenzitnih čelika u praksi se koriste dodatni materijali s postotkom ugljika manjim od 0,15 %. Kod većih udjela ugljika može doći do hladnih pukotina i zakaljivanja u zoni utjecaja topline (ZUT) što rezultira povećanjem tvrdoće, čvrstoće, pada duktilnosti i gubitka korozijske postojanosti [3,5].

Pri zavarivanju martenzitnih čelika s približno 0,15 % C preporučuje se [3]:

1. Koristiti sušene elektrode, odnosno prašak za zavarivanje,
2. Temperaturu predgrijavanja i međuprolaznu temperaturu održavati od 200 °C do 300 °C,
3. Vrste dodatnog materijala:
 - austenitni dodatni materijal, ali prilikom naknadne toplinske obrade može doći do pojave krhkosti zavarenog spoja,
 - za postizanje određene čvrstoće, dinamičke izdržljivosti te, ako se boja zavarane smije razlikovati od osnovnog materijala, koriste se istovrsni ili slični dodatni materijali. Prilikom korištenja takvih dodatnih materijala potrebno je provoditi toplinsku obradu popuštanjem na 700 – 750 °C zbog loše duktilnosti jer se nakon zavarivanja metal zavarane sastoji od martenzita, delta ferita i djelomično zaostalog austenita.

2.2.2 Feritni čelici

Feritni čelici imaju feritnu mikrostrukturu na sobnoj temperaturi bez sposobnosti fazne transformacije i usitnjenja zrna. Sadrže od 13 % Cr pa čak i do 30 % Cr i manje od 0.1 % C. Za povećanje njihove otpornosti na koroziju se dodaje Mo, a za bolju zavarljivost legiraju se još i sa Ti i Nb. S obzirom na austenitne čelike imaju veću otpornost na napetosnu koroziju u kloridnim medijima, a jeftiniji su od njih. Na slici 1. je prikazana mikrostruktura feritnih čelika [6, 7].



Slika 1. Mikrostruktura feritnih čelika [7]

Grijanjem feritnih čelika iznad 850 °C dolazi do pogrubljenja zrna. To je najviše izraženo u području ZUT-a, gdje se javljaju visoke temperature prilikom zavarivanja. Već iznad 600°C počinje znatno rasti veličina zrna što rezultira s padom vrijednosti mehaničkih svojstava. Na većim temperaturama može doći do izlučivanja Cr po granicama zrna u ZUT-u što dovodi do pojave interkristalne korozije. Pri držanju u temperaturnom rasponu od 520 °C do 850 °C dolazi do stvaranja σ – faze. U temperaturnom rasponu od 350 °C do 520 °C dolazi do krhkosti "475" time i do smanjenja duktilnosti te povećanja čvrstoće i tvrdoće [5, 6].

Za zavarivanje feritnih čelika potrebno je koristiti sušene bazično obložene elektrode i prašak, predgrijati na temperaturni raspon od 200 °C do 300 °C, osigurati minimalni unos topline do 1,5 kJ/mm zbog sprječavanja većih pogrubljenja zrna te koristiti odgovarajuće austenitne dodatne materijale zbog pada žilavosti u području zavarenog spoja [5, 6].

2.2.3 Austenitni čelici

Austenitni čelici su danas najraširenija grupa s gledišta primjene i proizvodnje, a karakterizira ih visoka duktilnost i niska čvrstoća. Austenitne čelike također karakterizira visoka otpornost na rupičastu koroziju, napetosnu i interkristalnu, ali ta otpornost se može smanjiti u ZUT-u zbog visokih temperatura. Posjeduju visoku duktilnost pri niskim temperaturama. Uglavnom sadrže 0,002 – 0,15 %C, 15 – 20 %Cr te 20 % Ni. Dodaju im se još i određene količine Mo, Ti, Nb, Ta i N. Nikal i dušik djeluju na proširenje austenitnog područja. Nedostatak tih čelika je nisko naprezanje tečenja ($185 - 225 \text{ N/mm}^2$). Dodavanjem Cr više od 18 % općenito se povećava otpornost prema koroziji. Titan i nobij u austenitnim čelicima služe za vezivanje s ugljikom prilikom sporog grijanja ili hlađenja te se time dobiva niski sadržaj ugljika (do 0,03 %) što sprječava interkristalnu koroziju. Za povećanje otpornosti prema napetosnoj i rupičastoj koroziji u leguru se dodaje molibden, dok nikal još dodatno povećava otpornost prema napetosnoj koroziji [5, 6, 7].

Danas se austenitni čelici smatraju relativno zavarljivim materijalima. Bez obzira na njihovu veliku otpornost prema koroziji, prilikom zavarivanja može se povećati osjetljivost prema koroziji u procjepu, može doći do pojave toplih pukotina i ostalo. Sprječavanje tih negativnih pojava vrši se pravilnim odabirom dodatnog materijala, osnovnog materijala te odgovarajućom tehnologijom zavarivanja [5, 6]

- Kod austenitnih čelika koeficijent toplinskog rastezanja je za oko 50% veći s obzirom na ostale čelike, što utječe na pojavu deformacija i zaostalih napetosti tijekom i nakon zavarivanja [6].
- Koeficijent toplinske vodljivosti je za oko 60 % manji od martenzitnih i feritnih čelika što rezultira slabijim odvođenjem topline u području zavarivanja. Može se spriječiti eventualno bakrenim podlogama koje omogućuju brže odvođenje topline iz područja zavarivanja [6].
- Specifični električni otpor je također povećan, a utječe na određene tehnološke zahtjeve kao što su jakost struje zavarivanja, slobodni kraj žice i ostalo [6].

Nepoštivanjem određenih zahtjeva tehnologije zavarivanja, dolazi do sljedećih problema koji se mogu svrstati u tri velike grupe [6]

1. Korozijske pojave,
2. Tople pukotine,
3. Izlučivanje σ – faze.

Opći zahtjevi koji su preporučeni za dobivanje kvalitetnog zavarenog spoja austenitnih čelika su [6]:

- izborom dodatnog materijala koji osigurava sadržaj δ – ferita čime se praktički otklanja opasnost od toplih pukotina,
- potrebno dobro očistiti i odmastiti površine prije zavarivanja,
- električni luk držati što kraćim,
- bitna vrsta i čistoća zaštitnih plinova te njihova mješavina,
- za tanke materijale nije potrebno predgrijavati, a za deblje je potrebno i to u temperaturnom rasponu od 100°C do 150°C,
- međuprolazna temperatura do najviše 150°C,
- odabrati takve uvjete zavarivanja koji osiguravaju miješanje s osnovnim materijalom manjim od 35 %,
- primjenjivati dodatne materijale sa što nižim postotkom ugljika,
- zbog jakih deformacija prilikom zavarivanja koristiti adekvatan način pripajanja i stezanja
- ne smije se ravnati plinskim plamenom jer može doći do pojave korozije,
- čekić, četka moraju isključivo biti od nehrđajućeg Cr ili Cr-Ni čelika.

3 ZAVARIVANJE PRAŠKOM PUNJENOM ŽICOM

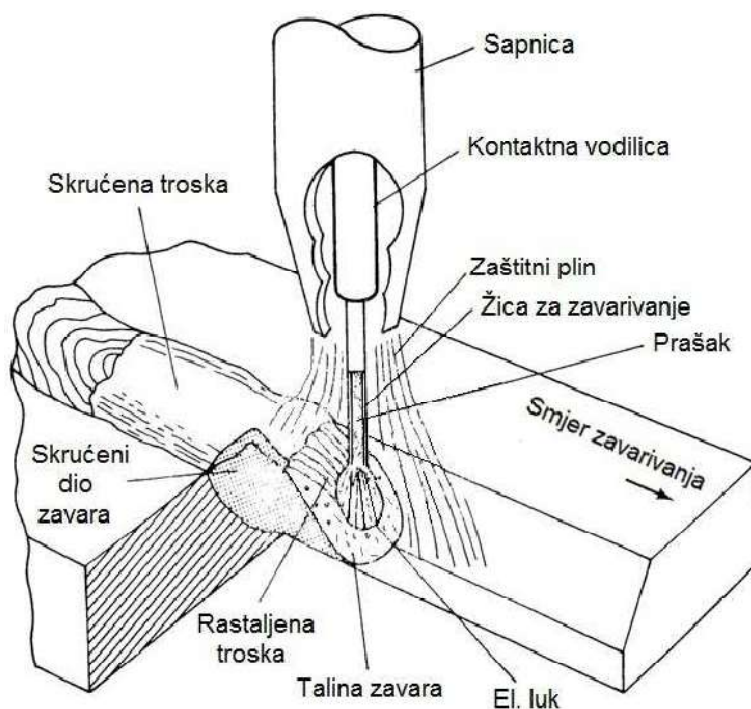
Prvi počeci primjene praškom punjenih žica kod zavarivanja javljaju se već prije 70 godina u obliku elektrode za REL postupak zavarivanja. Zbog skupe proizvodnje prešlo se na elektrode s vanjskom oblogom. Zbog sve većeg razvoja automatizacije, nastala je potreba za praškom punjenim žicama namotanih na kolut te je 1956. godine izum pod nazivom "acros patent" definirao način proizvodnje tankih punjenih žica rutilnim praškom za zavarivanje pod zaštitom plina. Ubrzo je u SAD-u razvijen automatski postupak zavarivanja s praškom punjenim žicama. U početku su se proizvodile samo žice promjera koji su iznosili 3,2 i 4,0 mm. Šezdesetih i sedamdesetih godina uglavnom se razvijala tehnologija za izradu što manjih promjera praškom punjene žice. Godine 1972. Alloy Rod razvio je tehnologiju za izradu praškom punjenih žica promjera 1,2 mm, a 10 godina kasnije i promjera od 0,9 mm. Razvojem manjih promjera te napredovanje opreme rezultiralo je mogućnošću zavarivanja u svim položajima, veću udobnost za zavarivača te svakim danom sve veću upotrebu u industriji [8, 9, 10].

Primjena praškom punjenih žica upotrebljava se gotovo u svim granama industrije, a vrlo uspješna primjena je u sljedećim područjima [8, 11]:

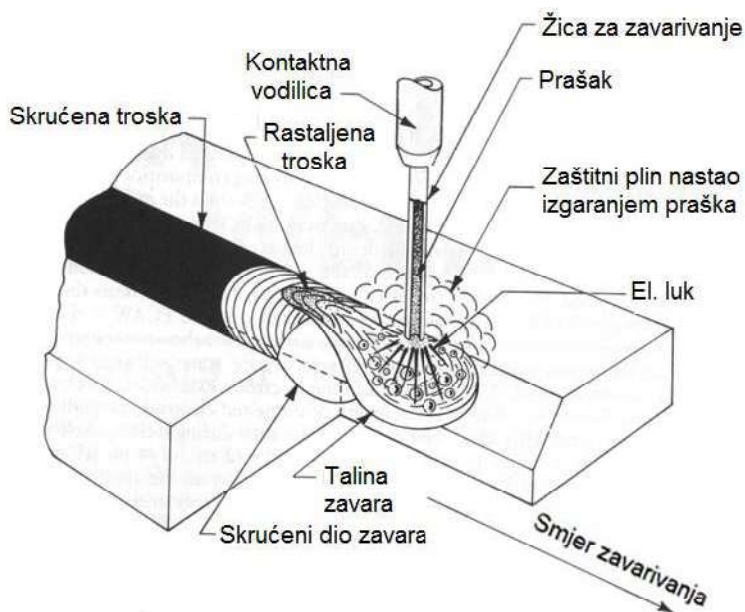
- rudarstvo,
- cementna industrija,
- armature,
- prerada kamena i kamenolomi,
- željezare,
- građevinarstvo,
- hidroenergetska postrojenja,
- brodogradnja,
- zavarivanje posuda.

Postoje dva glavna procesa zavarivanja praškom punjenom žicom [12]:

- **MAG zavarivanje praškom punjenom žicom** koristi zaštitni plin u svrhu zaštite metalne taline od štetnih atmosferskih utjecaja kao što su kisik i vodik. Zaštitni plin može biti ugljični dioksid ili mješavina ugljičnog dioksida i argona. Proces zavarivanja je prikazan na slici 2.
- **Zavarivanje samozaštitnom praškom punjenom žicom** kod ovog slučaja, talina zavora od štetnih atmosferskih utjecaja štiti se pomoću elemenata koji se nalaze u prahu te nije potrebna dodatna zaštita plinom. Prilikom zavarivanja takve žice izgaranjem stvaraju zaštitni plin ili trosku koja štiti zavar. Proces zavarivanja je prikazan na slici 3.



Slika 2. MAG zavarivanje s praškom punjenom žicom [12]



Slika 3. Zavarivanje samozaštitnom praškom punjenom žicama [12]

Prednosti zavarivanja praškom punjenim žica [8, 11, 12]

- velika količina nataljenog metala u jedinici vremena,
- manja vjerojatnost nastanka uobičajenih grešaka MAG postupka zavarivanja, npr. naljepljivanje,
- manje rasprskavanje prilikom zavarivanja te time i bolji izgled zavara,
- mogućnost zavarivanja u svim položajima promjene parametara,
- veća penetracija u odnosu na REL zavarivanje,
- dobivanje boljih mehaničkih svojstava, osobito žilavost,
- nije potrebno vezivo u prašku jer je punjenje zatvoreno stjenkama.

Nedostaci zavarivanja praškom punjenim žicama [11, 12]

- veliko zračenje topline kod zavarivanja, praškom punjene žice prilikom zavarivanja daju veću količinu topline $[Q]$ u odnosu na MAG zavarivanje za jednaku jakost struje, zbog manje površine presjeka praškom punjene žice,
- velika količina dimnih plinova koja se razvija iz praška,
- oprema je skuplja i kompleksnija za upravljanje te je moguće mijenjati više parametara u odnosu na EPP postupak zavarivanja.

3.1 Praškom punjene žice

Danas skoro svi proizvođači dodatnih materijala za zavarivanja u svojem proizvodnom programu sadrže praškom punjene žice za MIG/MAG ili EPP postupke zavarivanja. Praškom punjene žice sastoje se od plašta i jezgre koja se nalazi u središtu žice te ima sličan kemijski sastav oblozi na elektrodama za ručno elektrolučno zavarivanje. Prašak unutar žice ima jednaku zadaću kao i obloga kod elektroda, a to su ionizacija električnog luka, zaštita rastaljenih metalnih kapi i metala zavara od atmosferski plinova, dezoksidacija i legiranje metala zavara. Prednost praškom punjenih žica je mogućnost lakog automatiziranja i robotizacije, dok kod obloženih elektroda to nije moguće [10, 13].

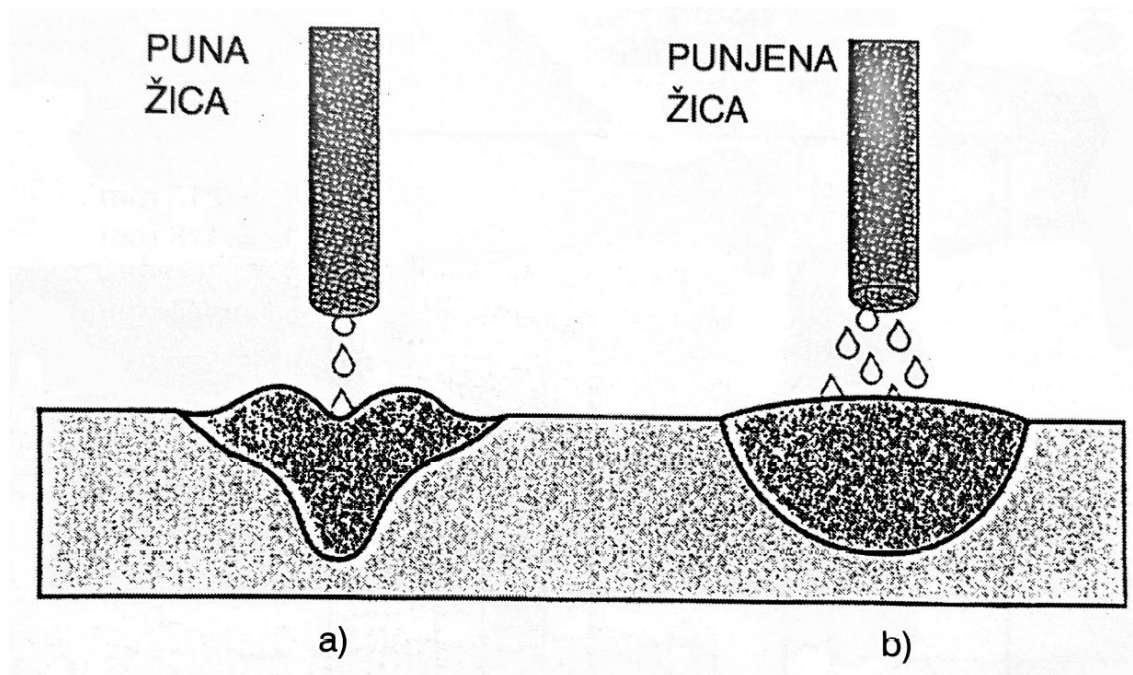
Praškom punjene žice mogu se dijeliti prema [10]:

- načinu izrade,
- načinu punjenja jezgre,
- tipu jezgre,
- položaju zavarivanja,
- količini legiranih elemenata u jezgri ili metalnoj traci.

Prema vrsti punjenja (tipu jezgre), praškom punjene žice se dijele na [10,13]:

- žice punjene rutilnim mineralnim praškom,
- žice punjene bazičnim mineralnim praškom,
- žice punjene metalnim praškom.

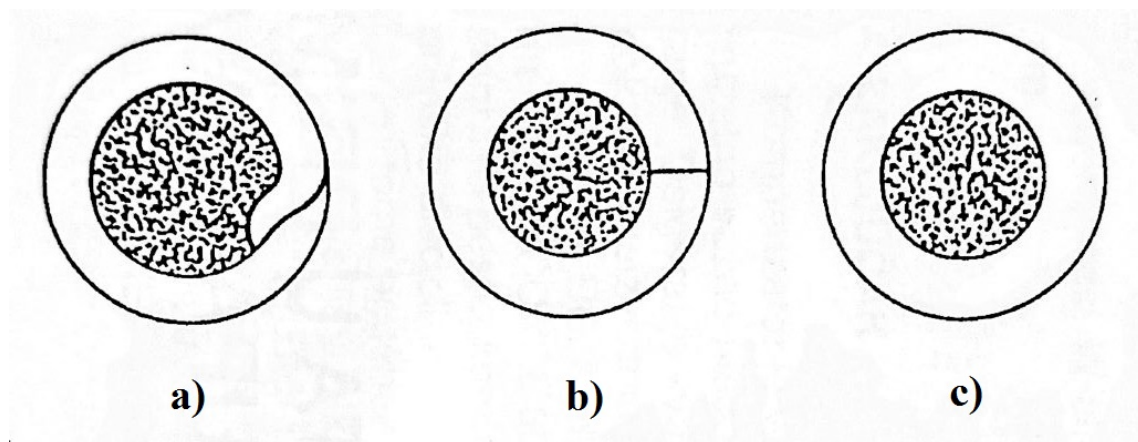
Zavari izvedeni praškom punjenim žicama puno su ljepšeg površinskog izgleda u odnosu na zavare izvedene punim žicama te je smanjena vjerojatnost grešaka kao što su naljepljivanje i nepravilno vezivanje u odnosu na zavarivanje punom žicom. Na slici 4. prikazana je razlika u prijenosu materijala između punjenih i punih žica [13].



Slika 4. Razlike u prijenosu materijala i izgledu rastaljene zone; a) puna žica; b) praškom punjena žica [13]

3.1.1 Podjela praškom punjenih žica prema načinu izrade

Praškom punjene žice prema načinu izrade mogu biti bešavne, šavne (sučeljeni spoj) i punjene žice s preklopnim spojem, prikazane na slici 5. Bešavne žice su najbolje jer nema opasnosti od vlaženja praška ili curenje istog na mjestu spoja. Takav oblik je najskuplji te se koristi kod zavarenih spojeva gdje je propisan vrlo strogi sadržaj vlage zbog sprečavanja nastanka vodika u depozitu. Stupanj punjenja im iznosi 12-14 %, osnovna žica je ugljični, nelegirani i niskolegirani čelik. Šavne punjene žice, kao i punjene žice s preklopnim spojem, koriste se za zavarivanje običnih čelika te zadovoljavaju s obzirom na cijenu i primjenjivosti. Stupanj punjenja šavnim žicama iznosi 18-24 %, osnovna žica je ugljični, nelegirani ili niskolegirani čelik dok je kod preklopnih žica stupanj punjenja 30-40 %, a osnovna žica je visokolegirani čelik [13].



Slika 5. Praškom punjene žice prema načinu izrade; a) žica s preklopnim spojem; b) šavna žica (sučeljeni spoj); c) bešavna žica [13]

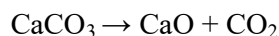
Praškom punjenu žicu moguće je izraditi na više načina, ali dva načina su se pokazala najboljima. [10]

Kod prvog načina, najprije se izradi šavna cijev iz trakica koja se nakon pregleda čiste i podvrgavaju toplinskoj obradi žarenjem. Zatim se cijev vuče na promjer kod kojeg je moguće vršiti punjene jezgre te se punjena žica vuče na odgovarajući promjer s međufaznim žarenjem. Nakon vučenja, žica se pobakri i namata na kolut. Tako se izrađuju punjene žice za koje je potrebno dodatno koristiti vanjsku zaštitu plina, mješavina plina ili praškom za zavarivanje [10].

Kod drugog načina izrade, metalna se traka savije u cijev nakon punjenja jezgre. Tim postupkom izrade dobivaju se punjene žice koje nisu zavarene, neko se rubovi samo dodiruju ili preklapaju. Nedostatak takvih žica je mogućnost prodora vlage u jezgru jer nije hermetički zatvorena što može dovesti do slabijih mehaničkih svojstava zavarenih spojeva. Metalna traka se prvo savije u U profil koji se puni materijalom jezgre te se savije u cijev i vuče na manje promjere. Nekada je potrebno međufazno žarenje posebice kod izrade tankih žica iz austenitnog čelika. Temperatura žarenja se kreće između 1000 i 1200 °C [10].

3.1.2 Samozaštitne praškom punjene žice

Tehnologija izrade i sastav samozaštitnih praškom punjenih žica su vrlo složeni problemi te ih dobro poznaju samo pojedine tvornice u svijetu. Sastav jezgre takve žice treba upotpunosti obavljati funkcije kao obloga kod elektrode za REL zavarivanje. Jezgra samozaštitne praškom punjene žice sadrži mineralne komponente kao što su TiO_2 , CaO , CaF_2 i ostalo te neke druge elemente kao što su Al , Li i ostalo. Vrlo važna komponenta u jezgri je CaCO_3 te ona prilikom zavarivanja proizvodi plin i trosku, a raspada se prema sljedećoj formuli [10]:



Samozaštitne praškom punjene žice većinom sadrže jezgru od bazičnog praška te su glavni sastojci jezgre kalcijev karbonat i fluoridi. Plin CO_2 koji nastaje izgaranjem jezgre štiti električni luk i rastaljeni materijal od štetnih plinova iz atmosfere, dok troska CaO veže na sebe nečistoće iz rastaljenog materijala te rezultira dobivanjem dobrih mehaničkih svojstava zavara. Neke žice sadrže i vrlo malu količinu aluminija koji je zaslužan za deoksidaciju i denitraciju metala zavara. Također se još dodaju litij i magnezij; litij pomaže u odstranjivanju dušika iz električnog luka i metala zavara, dok se magnezij veže za sumpor sprječavajući nastanak vrućih pukotina [10].

3.1.3 Žice punjene metalnim praškom

Žice punjene metalnim praškom relativno su novijeg datuma te je velika potražnja za njima na tržištu. Jezgre žice punjene su uglavnom metalnim praškom, a upotrebljavaju se za zavarivanje pod zaštitom plina, praška te za različite postupke zavarivanja. Metalne trake za takav tip žica izrađuje se od materijala sličnog osnovnom materijalu koji se zavaruje. Debljine tih traka iznose 0,5-1,27 mm te širine 8,6-17,5 mm [10].

Prednosti žica punjenih metalnim praškom u odnosu na praškom punjene žice [10]:

- pomoću sastava metalne jezgre je jednostavno i jeftino utjecati na tip punjene žice kao i na sastav metala zavara,
- nakon zavarivanja nije potrebno odstranjivanje troske te se u uskom spoju može zavariti više slojeva bez prekida zavarivanja,
- moguće ostvariti potpuno automatizirani i robotizirani postupak zavarivanja,
- visoki koeficijent taljenja zbog veće gustoće struje u jezgri žice,

- zbog sastava jezgre smanjuje se površinska napetost metala zavora te povećava penetracija,
- koeficijent iskorištenja električnog luka iznosi 85-95 %, što je vrlo visoko, dok je kod praškom punjenih žica oko 85 %.

Ovakav tip žica ima puno prednosti, no ima i nekoliko nedostataka kao što su [10]:

- veliki početni troškovi,
- skuplji zaštitni plin,
- visoka ultraljubičasta radijacija prilikom zavarivanja,
- mogućnost vlaženja jezgre,
- razvijanje velike količine topline u pištolju za zavarivanje.

Žice punjene metalnim praškom koriste se uglavnom za zavarivanje čelika visokih čvrstoća te čelika visokih žilavosti kod niskih temperatura. Vrlo su pogodne za korištenje zbog visoke produktivnosti, skoro pa i nema troske te mogu značajno legirati metal zavora. Danas se takav tip dodatnog materijala izrađuje isključivo prema narudžbi [10, 13].

3.1.4 Punjene žice s sastavom jezgre pretežito od mineralnih tvari

Žice koje su punjene uglavnom od mineralnih tvari zapravo su žice punjene rutilnim, bazičnim i praškom mješovitog tipa. Takva vrsta dodatnog materijala uglavnom zahtjeva zaštitni plin ili prašak [10].

Rutilni sastav praška u žicama sadrži više od 50 % TiO_2 , a za zavarivanje u vodoravnim položajima je povećan sadržaj TiO_2 čak do 65 %. Rutilni prašak je vrlo dobar ionizator i stabilizator električnog luka, omogućuje štrcajući električni luk te se troska lako skida zbog dobivanja vrlo glatke površine zavora. Kod zavarivanja čelika s takvim tipom žice dobivaju se vrlo dobra mehanička svojstva te visoka žilavost do temperature $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ za ugljik-manganove čelike. Najviše se upotrebljavaju žice debljine 1,2-2,4 mm te se postiže količina taljenja 10-12 kg/h [10].

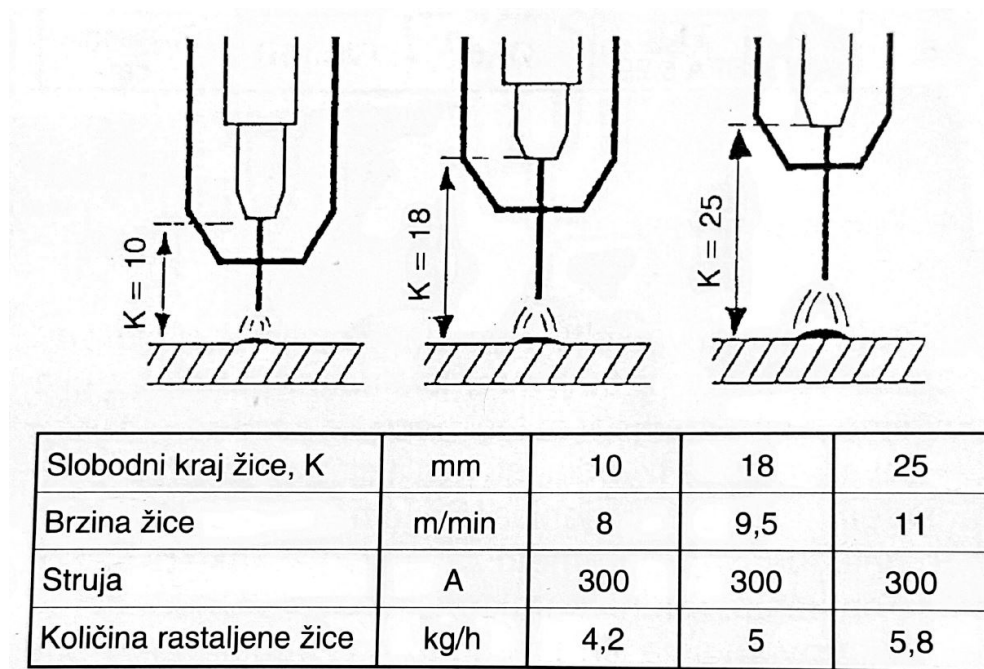
Bazični sastav jezgre punjenih žica daje bolju kvalitetu od rutilnog praška. Najvažniju ulogu u kvaliteti zavora omogućuje bazična troska koja izvlači iz zavora nečistoće i komponente koje tvore dodatne plinove što sprečava dolazak do poroznosti. Kod takvog tipa žica prijenos metala je u obliku krupnih kapljica te je prskanje materijala veće u odnosu na žice punjene rutilnim praškom. Na prskanje materijala dodatno utječe zaštitni plin te je

prskanje veće pod zaštitom 100 % CO₂ plina u odnosu na mješavinu s većim postotkom argona. Upotrebom sinergijskih izvora te dobrim odabirom parametara zavarivanja moguće je spriječiti rasprskavanje [10].

Puno proizvođača proizvodi punjene žice s različitim komponentama jezgre. Nekoliko primjera su punjene žice rutilno-fluoritna ili bazično-fluoritna te rutilno ili bazično-fluoritna s brzim ili sporim skrućivanjem troske [10].

3.2 Parametri zavarivanja i tehnika rada

Kao i kod svakog zavarivanja tako i kod zavarivanja raznorodnih čelika praškom punjenom žicom parametri su jedan od glavnih čimbenika za dobivanje kvalitetnog zavarenog spoja. Određuju se na isti način kao kod zavarivanja punom žicom, ali su područja primjene različita. Kod zavarivanja praškom punjenom žicom dolazi do većeg strujnog opterećenja električnog luka što utječe na količinu rastaljenog dodatnog materijala ili depozit, ukupno vrijeme zavarivanja te same troškove zavarivanja. Na količinu rastaljenog dodatnog materijala kao i na sami unos topline utječe dužina slobodnog kraja žice (Slika 6.) Povećanjem slobodnog kraja žice brzina dodavanja žice se povećava, ali i količina rastaljenog dodatnog materijala dok se smanjuje unos topline [13].



Slika 6. Utjecaj dužine električnog luka na količinu rastaljenog dodatnog materijala [13]

Zavarivanje se može izvoditi lijevom ili desnom tehnikom rada. Lijeve tehnike se koristi uglavnom za zavarivanje tankih limova radi što manjeg unosa topline dok se desnom tehnikom rada zavaruju deblji materijali gdje je potrebna veća penetracija, lakša kontrola taline te veći depozit.

3.3 Zaštitni plinovi

Osnovni materijal i vrsta praškom punjene žice određuje odabir zaštitnog plina za zavarivanje slično kao i kod klasičnog MAG zavarivanja. Zavarivanje pod zaštitom 100 % CO₂ preporučljivo je kod zavarivanja svih nelegiranih i niskolegiranih čelika radi niske cijene i dobivanja dobre kvalitete zavara. Može se uzeti u obzir i zaštitni plin 82 % Ar + 18 % CO₂, ali je tada potrebno uzeti u obzir razliku u cijeni s obzirom da je kvaliteta zavara neusporediva u odnosu na cijenu. Novija istraživanja upućuju na dodavanje 4 % kisika argonu te se pokazalo da takva mješavina omogućuje bolje karakteristike luka, manje prskanja te bolji izgled zavara [13].

4 ZAVARIVANJE RAZNORODNIH ČELIKA

Zbog sve većih zahtjeva u postrojenjima, kod kojih su opreme izložene raznim mehaničkim, toplinskim naprezanjima te agresivnijim korozijskim okruženjima primjenjuju se u sve većim količinama spojevi različitih materijala. U takvim postrojenjima zavarivanje je osnovni način spajanja te se zahvaljujući tome razvio problem zavarivanja raznorodnih čelika [14, 15].

Osim zavarivanja izvodi se i navarivanje, oblaganje – platiranje što je zaslužno za osiguranje mehaničke otpornosti pomoću jeftinijeg niskougljičnog/nelegiranog čelika. Takva izvedba raznorodnih metala se može koristiti u agresivnoj okolini pri većim mehaničkim opterećenjima. Danas se raznovrsni i platirani materijali koriste za izradu izmjenivača topline, nuklearnih reaktora, generatora pare, tlačnih spremnika za skladištenje agresivnih medija i ostalo [14].

Za dobivanje kvalitetnog zavarenog spoja raznorodnih materijala vrlo je važan izbor sastava dodatnog materijala, parametri zavarivanja i miješanje osnovnog materijala s dodatnim materijalom. Neki od problema koji se mogu pojaviti je migracija ugljika, toplinska naprezanja, krhkost navarenog sloja austenitnog čelika i ostalo. Zavarivanje raznorodnih čelika s različitim mikrostrukturnim osnovama se izvodi bez problema, npr. martenzitni čelik s niskolegiranim feritnim pri čemu se koristi standardni dodatni materijal. Prilikom zavarivanja martenzitnog čelika s austenitnim čelikom, potrebno je koristiti dodatni materijal na bazi nikla. [16, 17]

Gledajući s metalurškog stajališta zavarivanje raznorodnih čelika je kompleksnije od zavarivanja istorodnih čelika. Najčešće 3 vrste raznorodnih spojeva su [16]:

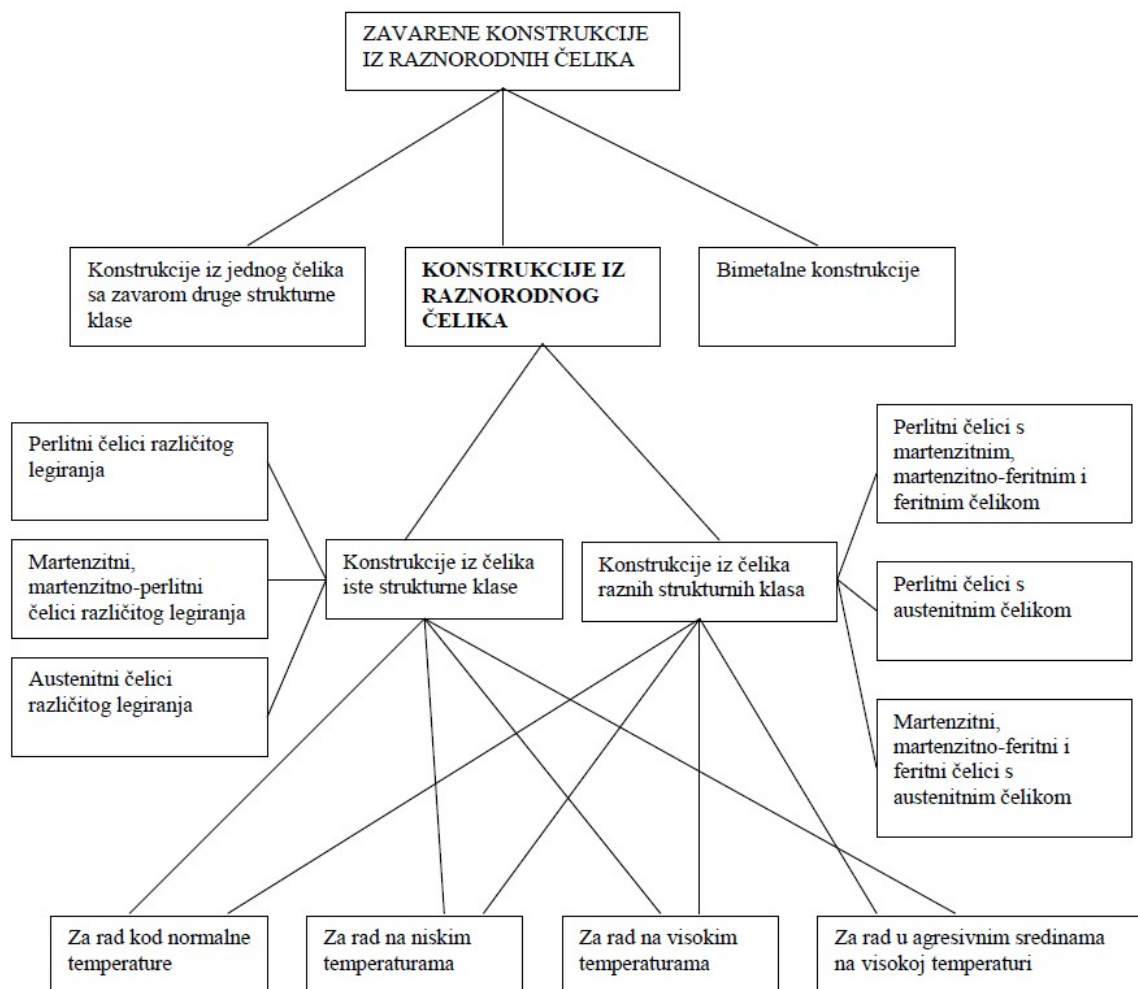
1. Zavarivanje različitih vrsta čelika,
2. Navarivanje legiranog ili niskolegiranog čelika slojem nehrđajućeg čelika za povećanje otpornosti na koroziju,
3. Zavarivanje istorodnih osnovnih materijala pomoću različitog dodatnog materijala,

Kod zavarivanja raznorodnih čelika potrebno je obratiti pozornost na sljedeće faktore:

1. Dodatni materijal se odabire prema svojstvima osnovnog materijala. Kod zavarivanja nelegiranih, niskolegiranih i srednje legiranih čelika se odabire bolje zavarljiv, dakle manje legirani. Kod zavarivanja visokolegiranog čelika s niskolegiranim ili nelegiranim odabire se visokolegirani dodatni materijal, jer će miješanjem doći do krhke martenzitne zone taljenja.
2. Predgrijavanje i temperatura između prolaza moraju odgovarati zahtjevima ZUT – a materijala 1, ZUT - a materijala 2 te zone transformacije. Ovisno o vrsti osnovnih materijala možda će biti potrebne različite temperature materijala 1 i materijala 2.
3. Potreban je dobar odabir režim zavarivanja i unos topline.
4. Dobar odabir toplinske obrade.

4.1 Podjela zavarenih konstrukcija iz raznorodnih čelika

Na slici 7. je prikazana jedna vrsta podjela zavarenih konstrukcija iz raznorodnih čelika. Takva podjela se najčešće nalazi u literaturama.



Slika 7. Osnovni način podjele zavarenih konstrukcija iz raznorodnih spojeva [15]

Iz slike 7. je vidljiva osnovna podjela na [15]:

- konstrukcije iz jednog čelika sa zavarom druge strukturne klase,
- konstrukcije iz raznorodnog čelika,
- bimetalne konstrukcije.

Konstrukcije iz raznorodnih čelika pak se dalje dijele na:

- konstrukcije iz čelika iste strukturne klase,
- konstrukcije iz čelika raznih strukturnih klasa.

Konstrukcije iz čelika iste strukturne klase detaljnije se još dijele na konstrukcije gdje su spojeni materijali [15]:

- perlitni čelici različitog legirnog sastava,
- martenzitni, martenzitno - feritni i feritni čelici različitog legirnog sastava,
- austenitni čelici različitog legirnog sastava.

Konstrukcije iz čelika raznih strukturnih klasa se mogu još podijeliti na konstrukcije gdje su spojeni razni komadi [15]:

- perlitni čelici s martenitnim, martenzitni – feritnim i feritnim čelicima,
- perlitni čelici s austenitnim čelicima,
- martenzitni, martenzitno – feritni i feritni čelici sa austenitnim čelicima.

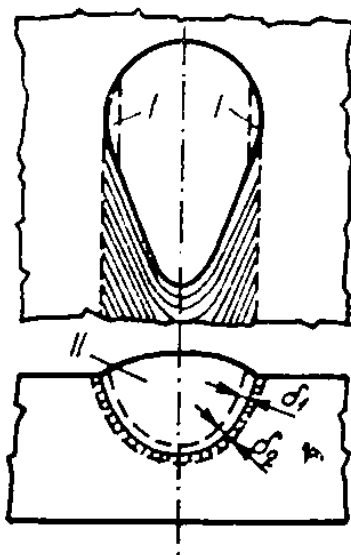
Postoji još i podjela prema uvjetima klasifikacije i vrsti primjene pa se zavarene konstrukcije mogu podijeliti na sljedeće grupe [15]:

- konstrukcije za rad pri sobnoj temperaturi,
- konstrukcije za rad na niskim temperaturama,
- konstrukcije za rad na visokim temperaturama,
- konstrukcije izložene agresivnom mediju pri visokoj temperaturi.

4.2 Teorijske osnove zavarivanja raznorodnih čelika

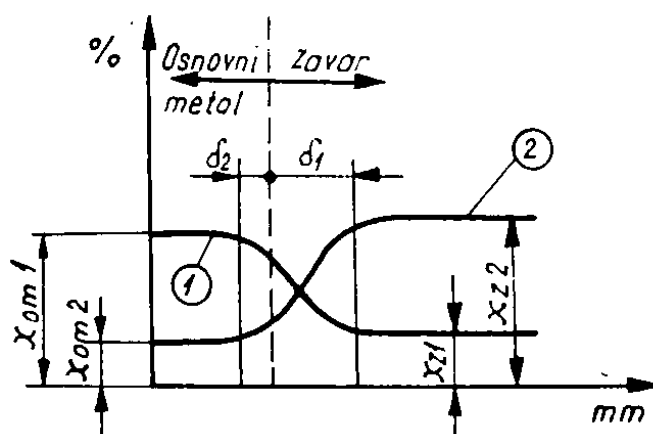
4.2.1 Stupanj protaljivanja (miješanja) i kemijska raznorodnost

Osnovni faktor, jedan od glavnih čimbenika koje treba ocijeniti kod izbora dodatnih materijala za zavarivanje raznorodnih čelika je protaljivanje ili penetracija osnovnog materijala kod zavarivanja. Oblik i dimenziju zone protaljivanja se može približno izračunati, a stupanj miješanja ovisi o više faktora. Neki od glavnih faktora su snaga izvora topline i karakter njegovog ponašanja, toplinska i fizikalna svojstva materijala i vrsta zavarenog spoja. Stupanj miješanja je direktno vezan s kemijskom raznorodnošću. Što je veći stupanj miješanja veća je nejednakost kemijskog sastava u zoni zavara jer je veći udio osnovnog materijala u sastavu metala zavara. Zbog različitog sastava osnovnog materijala i dodatnog materijala ne dolazi do kvalitetnog miješanja rastaljenog metala zavara kod granice spajanja osnovnog materijala i zavara kao što je prikazano na slici (8, - I). Ta zona ima prijelazni međusastav u odnosu na zonu prikazanu na (slici 8, zona - II). Širina zone δ_1 iznosi od 0,2 do 0,5 mm.[15, 19].



Slika 8. Prikaz zone taline metala zavora [15]

δ_2 iznosi od 0,1 do 0,2 mm kod elektrolučnog zavarivanja niskougličinih i Cr-Ni austenitnih čelika zbog postojanja dvofaznog stanja. Rastaljeni metal iz metala zavariva djelomično prodire u zoni II i time mijenja njen sastav. Na slici 9. je prikazana promjena kemijskog sastava u zoni miješanja zavariva i zoni miješanja osnovnog materijala [15].



Slika 9. Shematski prikaz kemijskog sastava u zonama miješanja metala zavora i osnovnog materijala [15]

x – maseni udio, [%]

δ – udaljenost od granice staljivanja, [mm]

x_{om1} – maseni udio kemijskog elementa „1“ u osnovnom materijalu [%]

x_{om2} – maseni udio kemijskog elementa „2“ u osnovnom materijalu [%]

x_{z1} – maseni udio kemijskog elementa „1“ u dodatnom materijalu [%]

x_{z2} – maseni udio kemijskog elementa „2“ u dodatnom materijalu [%]

Krivulja 1 prikazuje slučaj kada je sadržaj nekog elementa u osnovnom materijalu (x_{om1}) veći od sastava tog elementa u metalu zavora (x_{z1}), a krivulja 2 prikazuje kada je sadržaj nekog elementa u osnovnom materijalu manji od sastava tog elementa u metalu zavora [18,15].

Kemijska raznorodnost metala zavara se javlja kod čelika različitih kemijskih sastava, a utječe na eksploatacijske karakteristike metala zavara te na otpornost metala nastanku pukotina. Kod zavarivanja istorodnih čelika to ne stvara problem zahvaljujući relativno sličnom kemijskom sastavu osnovnog i dodatnog materijala. Kod raznorodnih materijala je potrebno osigurati minimalnu penetraciju osnovnog materijala, tj. svesti ga na minimum. Za dobivanje minimalne penetracije osnovnog metala potrebno je odabrati odgovarajući režim zavarivanja ili primjenom postupka zavarivanja koja će omogućiti minimum rastaljenog osnovnog materijala. Kemijska ravnomjernost je vezana s penetracijom koji zavisi o nekoliko faktora kao što su jačina struje zavarivanja koja najviše utječe, mehanička i termodinamička svojstva materijala i o vrsti zavarenog spoja. [15, 18, 19].

Stupanja miješanja moguće je izračunati prema sljedećoj formuli [15]:

$$\gamma = \frac{n}{n+m} \quad (1)$$

n – udio protaljenog osnovnog materijala u ukupnoj masi zavara [%]

m – udio nataljenog metala u zavaru [%]

Stupanj miješanja osnovnog materijala ovisi o vrsti i obliku zavarenog spoja, najmanji stupanj miješanja je kod navarivanja trakastom elektrodom što je vidljivo u tablici 3. koja prikazuje stupanj miješanja za razne vrste zavarivanja [15, 18].

Tablica 3. Stupanj miješanja s obzirom prema vrsti spoja i tehnologije zavarivanja [15]

Vrsta spoja	Strukturna klasa zavarenog čelika	Stupanj miješanja (u %) za vrstu zavarivanja			
		Ručno elektrolučno	EPP	Navarivanje trakastom elektrodom	Zavarivanje pod troskom
Navarivanje cilindra	Perlitni	15 – 40	25 – 50	8 – 20	-
	Austenitni	25 – 50	35 – 60	15 – 25	-
Jednoslojni sučeonni spojevi	Perlitni	20 – 40	25 – 50	-	20 – 40
	Austenitni	30 – 50	40 – 60	-	30 – 50
Korijenski zavari višeslojnih sučeonih i kutnih spojeva	Perlitni	25 – 50	35 – 60	-	-
	Austenitni	35 - 50	40 - 70	-	-

4.2.2 Strukturna raznorodnost materijala zavarenih spojeva raznorodnih čelika

Strukturna raznorodnost je drugi bitan faktor koji je potrebno poznavati kod zavarivanja raznorodnih čelika. Mehanička svojstva, pouzdanost spojeva i proizvoda su povezane sa strukturnom raznorodnošću te se mogu osigurati samo ako u području zavora nema oslabljenih mjesta i krtih zakaljenih međuslojeva. Da bi se to osiguralo potrebno je paziti kod samog odabira materijala za zavarivanje konstrukcija iz raznorodnih čelika, odrediti stupanj miješanja osnovnog metala te ispravno ocijeniti strukturu koja će se javiti u zoni zavarenog spoja [15, 19].

Za zavarivanje niskolegiranih zakaljivih čelika s austenitnima postoje dva osnovna uvjeta [15]:

- Pažljiv odabir elektroda da bi se spriječila mogućnost nastanka toplih pukotina u austenitnom području,
- mogućnost upravljanja procesima difuzije elemenata iz niskolegiranog čelika, najčešće ugljika, iz osnovnog metala, u zonu spajanja, što dovodi do krtih međustruktura.

Prvi uvjet određuje kvalitetu elektrode, a drugi određuje područje primjene zavarenog spoja. Vrlo je važno u praksi ocijeniti strukturu koja će se pojaviti u zavarenom spoju nakon zavarivanja raznorodnih čelika. Trenutno je najjednostavnije i dovoljno točno ocijeniti pomoću Schaefflerovog dijagrama [15].

4.2.3 Schaefflerov dijagram

Kao što je već ranije spomenuto, Schaefflerov dijagram se koristi za određivanje strukture visokolegiranih čelika koji se brzo hlade nakon zavarivanja, (Slika 10). Schaefflerov dijagram daje strukturu depozita, odnosno zone taljenja kod zavarivanja ili navarivanja raznorodnih čelika, npr. nelegiranog ili niskolegiranog s visokolegiranim feritnim ili austenitnim čelikom. Depozit se hladi vrlo brzo pa se ne koristi za osnovni materijal ili kod zavarivanja s vrlo sporim hlađenjem. Dijagram na apscisi sadrži ekvivalente kroma, a na ordinati ekvivalente nikla. Struktura depozita se određuje na temelju kemijskog sastava koji se izražava ekvivalentima nikla i kroma te sastav strukture depozita se određuje u područjima[1,15]:

- austenita (A),

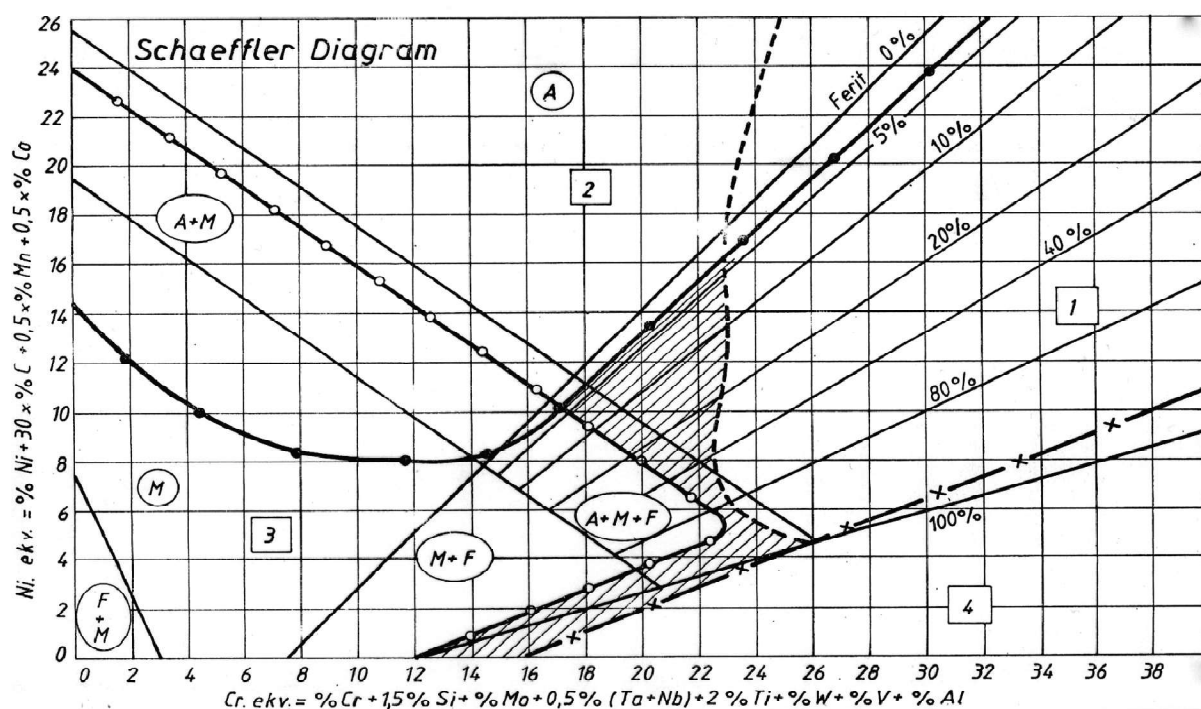
- martenzita (M),
- ferita (F),
- kombinacije (A + F; A + M; A + M + F; F + M).

Ekvivalenti za nikal i krom se izračunava prema formulama [19]:

$$Ni_{ekv} = \%Ni + 30 \times \%C + 0,5 \times \%Mn + 0,5 \times \%Co$$

$$Cr_{ekv} = \%Cr + 1,5 \times \%Si + \%Mo + 0,5 \times \%(Ta + Nb) + 2 \times \%Ti + \%W + \%V + \%Al$$

Dijagram je razvio Schaeffler 1949. godine, a kasnije ga je dopunio DeLong i M.C.T. Bystram. DeLong je modificirao ekvivalent Ni time što je u formulu unio utjecaj dušika i mjereći sadržaj delta ferita feritnim brojem FN [1, 14].



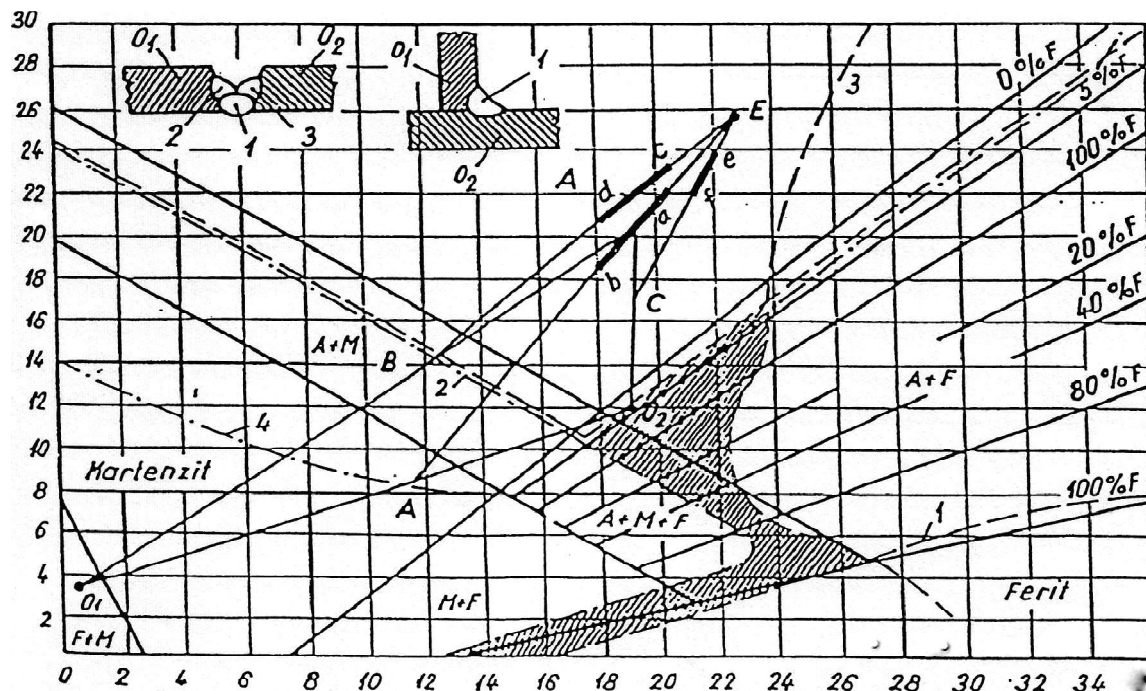
Slika 10. Schaefflerov dijagram [14]

Dopuna koju je Bystram uveo obuhvaćaju 4 linije koje označavaju 4 područja [14, 19, 18]:

1. **Područje** – Kod tog područja na temperaturama od 500°C do 900°C dolazi do pojave krhke σ - faze u osnovnom i dodatnom materijalu što rezultira povećanom krhkošću. U austenitno feritnom polju najviše su skloni čelici s više od 10% δ – ferita (α – faze).
2. **Područje** – To područje obuhvaća uglavnom materijale s austenitnom i djelomice austenitno - martenzitnom strukturom. Iznad 1250°C materijali su skloni toplim pukotinama. Rješenje za zavarivanje materijala u tom području je korištenje dodatnog materijala koji u strukturi metala zavora osigurava 3 – 10 % ferita.
3. **Područje** –U tom području se nalaze zavareni spojevi s krhkom martenzitno – austenitnom i martenzitno – feritnom strukturom. Vrlo su skloni hladnim pukotinama ispod 400°C. Predgrijavanjem i naknadnom toplinskom obradom žarenjem se može riješiti problem hladnih pukotina. Ovo područje prekriva i jedan dio područja 2 u prekriženom dijelu te može doći i do pojave toplih pukotina.
4. **Područje** – Obuhvaća veliki dio čistog ferita i djelomično austenita time i korozijski postojeće čelike s vrlo niskim sadržajem ugljika. Iznad 1100°C dolazi do jakog rasta kristalnog zrna te su posljedice krhkost, znatno smanjenje žilavosti te sklonost pukotinama.

Šrafirani dio u dijagramu označava područje optimalnog sastava zavarenog spoja. Zato je potrebno voditi računa da se zavar nalazi u tom području. U praksi nije uvijek moguće pa se poduzimanjem drugih mjera može doći do kvalitetnih zavora. Čelik određenog kemijskog sastava se može označiti na Schaefflerovom dijagramu omeđenim područjem koje određuje mogući položaj čelika konkretnog sastava. Čelik određenog kemijskog sastava kao i dodatni materijal se na dijagramu označavaju točkama koje su definirane njihovim Cr i Ni – ekvivalentom. Takav slučaj je prikazan na slici 11. Podjeli li se pravac koji spaja osnovni i dodatni materijal u postotnim iznosima dobiva se veličina koja odgovara postotku miješanja osnovnog i dodatnog materijala. Na tom pravcu se također može pratiti strukturno stanje zavarenog spoja. U korijenskom sloju 1 na slici 11. srednji sastav rastaljenih ivica lima odgovara točki A na liniji O1 – O2. Kod austenitnog čelika (O2) miješanje je veće nego kod feritno – perlitnog čelika (O2) zbog manje toplinske provodljivosti austenitnog čelika pa za niskolegirani čelik stupanj miješanja iznosi 40 %, a austenitni čelik oko 60 %. Na dužini AE dijelom a – b je određena struktura i sastav korijenskog sloja. Dijelom c – d na liniji BE je određen sastav metala koji nastaje miješanjem niskolegiranog feritno – perlitnog čelika i

korijenskog sloja. Miješanje austenitnog čelika i korijenskog sloja nastaje na liniji CE kod odsječka e – f [14, 15].



Slika 11. Primjena Schaefflerovog strukturnog dijagrama pri određivanju kemijske i strukturne heterogenosti slojeva zavora [14]

Feritni broj (FN) u principu određuje otpornost metala zavora na vruće pukotine te označava postotak δ – ferita u metalu zavora nehrđajućih čelika. U tablici 4. je navedena tipična vrijednost feritnog broja za pojedine metale zavora [20]

Tablica 4. Približne vrijednosti feritnog broja (FN) za pojedine metale zavora [14]

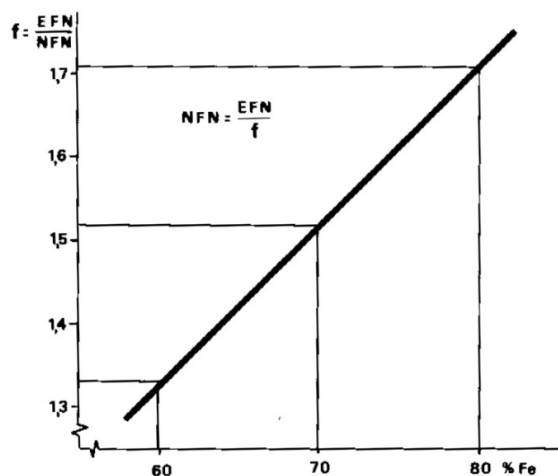
Metal zavora	Feritni broj (FN)
Potpuno austenitni metal zavora (visoka korozijska otpornost u jako oksidirajućem i manje kiselim mediju koji sadrži kloride)	FN < 0,5
CrNiMoN metal zavora, nemagnetičan	FN < 0,5
Nisko feritan CrNiN i CrNiMoN metal zavora	FN 6 – 15 ili < 0,5
Metal zavora nehrđajućeg čelika s otpornošću na vruće pukotine i mikropukotine	FN 6 – 15
Austenitno – feritni metal zavora za raznorodne spojeve i prijelazne slojeve	FN 15 – 35
Austenitno – feritni metal zavora s visokom otpornošću na napetosnu i rupičastu (piting) koroziju	FN 30 -70

Metoda koja je međunarodno priznata za određivanje broja ferita temelji se na jednakomjernom definiranom odnosu magnetske sile i sadržaja ferita u zavaru. Takav je odnos nezaobilazan zato što ne postoji pouzdana metoda za određivanje ferita u nehrđajućem čeliku. Sila između trajnog magneta i metala zavora mjeri se torzijskom vagom te se vrijednosti uspoređuju[20].

Sadržaj ferita u metalu zavora moguće je dobiti putem proračuna na temelju kemijskog sastava metala zavora. Izračunaju se Cr i Ni – ekvivalenti koji se zatim ucrtavaju u dijagrame koji su zasnovani na temelju metalurških istraživanja, a to su [20]:

- Schaefflerov dijagram, najprikladniji dijagram za opću sliku strukture metala zavora, ali za točno određivanje FN – a u metalu zavora nije.
- DeLongov dijagram, objavljen 1973. godine, dobar je za ograničeni raspon metala zavora CrNiMo, CrNiN i CrNiMoN čelika.
- Najtočnije određivanje FN je pomoću WRC 1992 Constitution dijagrama, kojeg su preradili Kotecki i Siewert na temelju WRC 1988 Constitution dijagrama objavljenog od Siewerta, McCowana i Olsona. Najtočnije određivanje FN – a je pomoću tog dijagrama zahvaljujući točnom određivanju utjecaja Mn, Si, C, N i Nb.

Dugogodišnje korištenje WRC 1992 Constitution dijagrama je dokazalo da daje najbolju procjenu feritnog broja, a stari Schaefflerov daje najbolje rezultate za raznorodne spojeve, zavarivanje čelika s prevlakama, proračun sastava i položaj razrijeđenog metala zavora. Feritni broj nije jednak sadržaju ferita u metalu zavora, sadržaj ferita niti se ne može točno izmjeriti, ali je moguće izračunati dijeljenjem FN s faktorom f. Faktor f pak je ovisan o postotku željeza u metalu zavora te se dobiva putem dijagrama koji je prikazan na slici 12. [20].



Slika 12. Faktor f koji ovisi o postotku Fe u metalu zavora [20]

4.2.4 Izbor postupka zavarivanja

Za zavarivanje raznorodnih čelika nije toliko bitan postupak zavarivanja, ali je vrlo bitno odabrati dobru tehnologiju zavarivanja koja će osigurati malo miješanje - protaljivanje rastaljenog dodatnog materijala s osnovnim. Takvom tehnologijom zavarivanja će se spriječiti nastanak krhkih struktura i pukotina u prijelaznom sloju. U tablici 5. je prikazan stupanj miješanja za neke postupke zavarivanja taljenjem [14].

Postupci za zavarivanje čelika različitih struktura su [14]:

- Postupci zavarivanja taljenjem (REL, MIG, MIG praškom punjenom žicom, EPP, TIG...),
- Postupci zavarivanja taljenjem s vrlo niskim razrjeđenjem kao što su zavarivanje pulsirajućim lukom, zavarivanje elektronskim mlazom i zavarivanje laserom,
- Postupci spajanja bez taljenja (zavarivanje trenjem, zavarivanje eksplozijom, tvrdo lemljenje...).

Tablica 5. Stupnjevi miješanja za pojedine postupke zavarivanja taljenjem [14]

Postupak	Stupanj miješanja (dilucije), d
EPP zavarivanje trakom / TIG postupkom s toplom žicom	8 – 20 %
TIG	15 – 100 %
REL postupak s rutilnom žicom	15 – 25 %
REL postupak s bazičnom žicom	20 – 30 %
MAG	20 – 40 %
MAG, impulsno	10 – 30 %
EPP zavarivanje žicom	30 – 50 %

4.2.5 Dodatni materijal

Izbor dodatnog materijala ovisi o dobivenoj kvaliteti i svojstvima zavara. Kod zavarivanja raznorodnih čelika predstavlja problem što se svojstva osnovnih materijala bitno razlikuju. Dodatni materijal se može razlikovati od oba osnovna materijala ili je blizak više legiranom čeliku što ovisi o vrsti materijala koji se spaja. Najvažnije je odabrati takav dodatni materijal koji će osigurati veću čvrstoću zavara od čvrstoće manje legiranog čelika. Za zavarivanje feritno – perlitnih čelika s austenitnim korozijski postojanim čelikom preporučuje se primjena austenitnog dodatnog materijala. Tim se dobiva zadovoljavajuća mehanička i strukturna svojstva zavara. Kod spajanja martenzitnih čelika i niskolegiranih feritnih čelika kao i martenzitnih čelika s austenitnim može se izvesti sa standardnim dodatnim materijalom, a kod zavarivanja martenzitnog i austenitnog čelika se koristi dodatni materijal na bazi nikla. Korištenjem dodatnog materijala na bazi nikla, martenzitna zona može biti smanjena što zavareni spoj čini otpornijim na povišenim temperaturama. Ako se zavaruju čelici kojima su tališta vrlo različita npr. kod zavarivanja feritno– perlitnih s austenitnim čelicima, temperatura skrućivanja metala zavara mora biti bliža čeliku s nižim talištem. Ako je temperatura skrućivanja metala zavara veća moguća je pojava toplih pukotina u ZUT – u [14, 17].

4.3 Problemi kod zavarivanja raznorodnih čelika

4.3.1 Difuzijski procesi

Difuzijski procesi predstavljaju jedan od najvećih problema kod zavarivanja raznorodnih čelika. Difuzija je kretanje atoma kroz materijal te time dolazi do nastanka kemijskih i strukturnih neravnomjernosti što vrlo utječe na kvalitetu zavarenog spoja raznovrsnih čelika. Do procesa difuzije dolazi prilikom samog zavarivanja, naknadne toplinske obrade i pri radu na visokim temperaturama. [14, 21]

Gibanje atoma kroz materijal događa se raznim oblicima difuzije [14]:

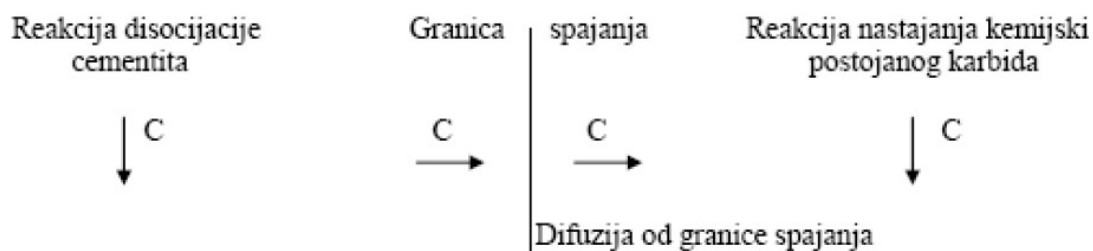
1. volumna difuzija, atomi se gibaju kroz kristalnu rešetku,
2. površinska difuzija, gibanje atoma po površini,
3. gibanje atoma kroz granice kristala,
4. gibanje atoma kroz dislokaciju i drugih površinskih i linijskih nepravilnosti.

Najveću difuzijsku pokretljivost u spoju raznorodnih čelika posjeduje ugljik zbog njegovih vrlo malih veličina atoma. Ugljika ima čak od 10^4 do 10^6 puta veću pokretljivost u odnosu na druge legirne elemente. Ispitivanjem je uočeno da nakon difuzije dolazi do razugljičenja na strani ugljičnog čelika, a pougljičenja na strani austenitnog čelika. Razugljičenje se ne može izbjeći ni korištenjem dodatnog materijala na bazi nikla. Kada je zavareni spoj izložen visokim temperaturama duže vrijeme ugljik difundira iz područja materijala s nižim postotkom Cr u materijal s višim postotkom Cr. Do difuzije ugljika dolazi, ako postoji razlika u sadržaju karbidotvoraca kao što su Cr, Mo, Nb i ostali. Ako je ta razlika jako velika, doći će do difuzije C iz čelika nižeg postotka C u čelik s više postotka C. Najniža temperatura kod koje počinje difuzija ugljika iznosi $425\text{ }^{\circ}\text{C}$, a kod $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ je difuzija najintenzivnija. [1, 18, 21]

Postoji veliki broj faktora koji omogućuju difuziju lako pokretljivih elemenata u zavarenom spoju [21]:

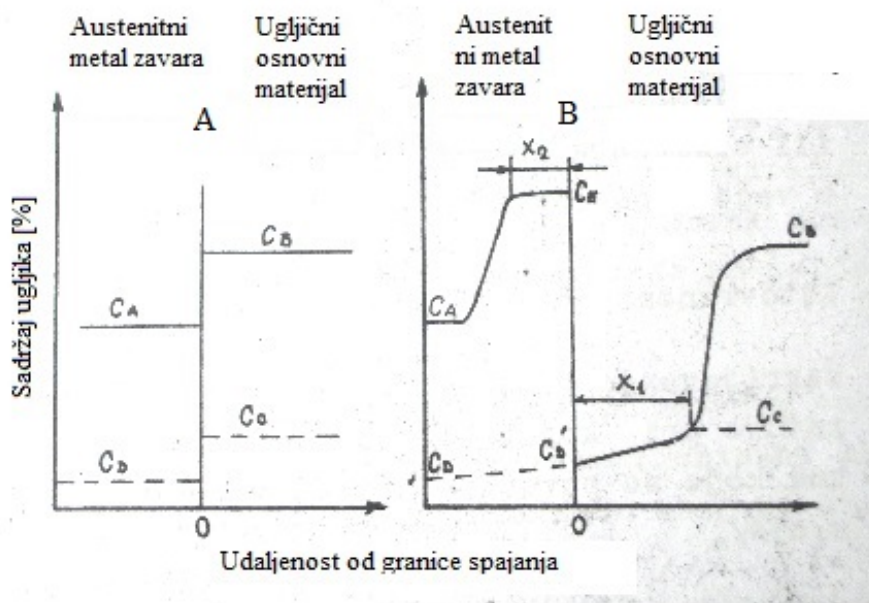
- prisutnost elemenata s većim afinitetom prema ugljiku u jednom od čelika koji se zavaruje u usporedbi sa željezom,
- istovremena tekuća i čvrsta faza u zoni spajanja,
- zagrijavanje okolne zone materijala koji se zavaruje do temperature kod koje dolazi do transformacije željeza $\alpha \rightarrow \gamma$ pri kojoj je povećana rastvorljivost ugljika,
- velika razlika sadržaja ugljika u metalima koji se zavaruju.

Na slici 13. je prikazana pojava difuzije ugljika kod zavarivanja ugljičnog čelika s austenitnim čelikom



Slika 13. Difuzija ugljika prilikom zavarivanja ugljičnog čelika s austenitnim čelikom [21]

Na strani ugljičnog i austenitnog čelika razlikuje se koncentracija ugljika kao i njegova rastvorljivost na granici spajanja. To je neophodno za izjednačavanje sadržaja rastvorenog ugljika difuzijom njegovih atoma iz zasićenog stanja cementitom u stanje zasićeno karbidom. Na slici 14. je prikazan proces difuzije u zoni spajanja ugljičnog osnovnog materijala s austenitnim dodatnim materijalom [21].

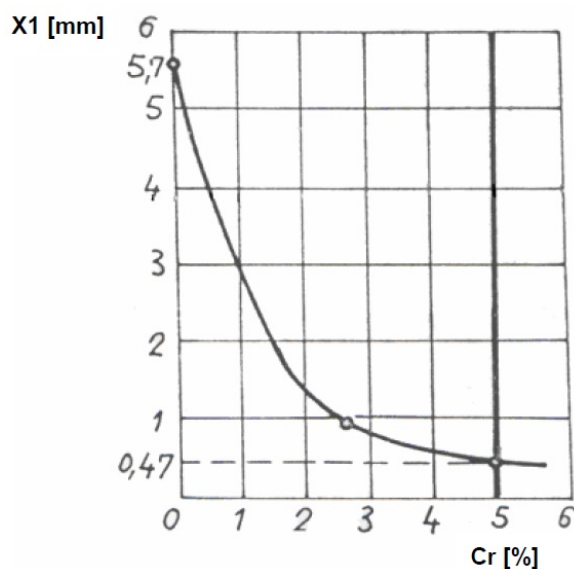


Slika 14. Proces difuzije kod spajanja ugljičnog osnovnog čelika s austenitni dodatnim materijalom [18]

Pomoću C_A i C_B na slici 14. označavaju koncentraciju ugljika u metalu zavara i osnovnom materijalu, C_C i C_D koncentraciju otopljenosti ugljika u metalu zavara i osnovnom materijalu. Dijagram A prikazuje koncentraciju ugljika u zoni spajanja odmah nakon zavarivanja, a dijagram B nakon termičke obrade [21].

Prilikom difuzije ugljika iz ugljičnog čelika u austenitni dolazi do poremećaja ravnoteže na strani ugljičnog čelika. Da bi se ta ravnoteža sačuvala, ugljik difundira iz dijelova udaljenih od zone spajanja što rezultira pojavom disocijacije cementita na mjestima udaljenijim od zone spajanja. Posljedica toga je da se u blizini spajanja prepoznaje razugljičeni sloj na strani ugljičnog čelika širine X_1 , a koncentracija otopljenog ugljika opada sa C_C na C_D . Difundirani ugljik iz ugljičnog materijala se veže s elementima koji su skloni vezanju s karbidima. Stvaranje karbida se događa uz granicu spoja, kada se iscrpe elementi koji grade karbide. Ta zona se proširuje pa se za vrijeme odvijanja difuzije koncentracija ugljika na strani austenitnog metala zavara C_A mijenja na koncentraciju C_E [21].

Za smanjenje difuzije ugljika najefikasnija mjera je legiranje ugljičnog čelika s elementima koji su skloni vezati se s ugljikom tvoreći karbide u ugljičnom čeliku. Djelomično ili potpuno stvaranje stabilnih karbida u ugljičnom čeliku smanjuje u njima koncentraciju rastvorenog ugljika C_C , a time i razliku $C_C - C_D$. Najčešći element za stvaranje stabilnih karbida je krom te je na slici 15. Prikazan njegov utjecaj na razvitak difuzijskih slojeva. [21]



Slika 15. Utjecaj sadržaja kroma u ugljičnom čeliku na širinu razugljičenog sloja [17]

Iz dijagrama je vidljivo da kod zavarivanja čelika s 5 % Cr nastaje širina razugličenog sloja od 0,47 mm. Time se smatra da kod zavarivanja raznorodnih čelika, gdje ugljični čelik posjeduje minimalno 5 %Cr skoro pa isključuje razvijanje difuzije. Za sprječavanje difuzije osim kroma u osnovni materijal se mogu dodati i drugi elementi koji tvore karbide (titan, niobij, vanadij) [21].

4.3.2 Zaostala naprezanja i deformacije zavarenih spojeva iz raznorodnih čelika

Do naprezanja u zavarenom spoju dolazi isključivo zbog zavarivanja, a uzroci tome su neravnomjeran raspored topline od zavarivanja te krutost zavarenih spojeva. Zaostala naprezanja mogu nastati u zavarenom spoju raznorodnih čelika [14, 15]:

- Prilikom zavarivanja, zbog neravnomjerne raspodjele topline te krutosti zavarenog spoja koja sprečava toplinske deformacije pa nastaju plastične deformacije,
- Podvrgavanjem zavarenog spoja toplinskoj obradi,
- Prilikom rada kod cikličkih promjena temperature.

Na naprezanja utječu još i mehanička i fizikalna svojstva čelika koji se zavaruju, a to su koeficijent linearnog istezanja, toplinska vodljivost, modul elastičnosti i ostalo. U tablici 6. su prikazana svojstva pojedinih čelika [14].

Tablica 6. Svojstva različitih vrsta čelika [14]

	Austenitni Cr-Ni čelici	Feritni Cr čelici	Martenzitni Cr čelici	Precipitacijom očvrsnuti čelici	Ugljični čelici
Gustoća, $\rho/\text{kg m}^{-3}$	7800-8000	7800	7800	7800	7800
Koeficijent linearnog istezanja (0–500 °C), $\alpha/10^{-6}\text{K}^{-1}$	17,0–19,2	11,2-12,1	11,6-12,1	11,9	11,7
Koeficijent toplinske vodljivosti (100 °C), $\lambda/\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$	18,7-22,8	24,2-26,3	28,7	21,8-23	60
Specifični električni otpor $/10^{-6}\Omega\text{m}$	69-102	59-67	55-72	77-102	12
Specifični toplinski kapacitet (0 – 100 °C) $c/\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$	460-500	460-500	420-460	420-460	480
Vlačni modul elastičnosti, E/GPa	190-200	200	200	200	210
Temperatura taljenja /°C	1400-1450	1480-1530	1480-1530	1400-1440	1538

Vidljiva je razlika modula elastičnosti od 10 % između feritno – perlitnog čelika i austenitnog u korist austenitnog čelika. Zavarivanjem takve kombinacije materijala konstrukcija treba biti prethodno zavarena s minimalnim naprezanjima kako ne bi došlo do pojave pukotina zbog napetosne korozije. Kod zavarivanja raznovrsnih čelika s različitim koeficijentima linearnog istezanja moguća je pojava pukotina za vrijeme rada zbog cikličkih promjena temperature. Kod takvog slučaja je potrebno koristiti dodatni materijal čiji je koeficijent linearnog istezanja vrlo sličan kao kod ugljičnog konstrukcijskog čelika, npr. nikal – legure. Tada će se najveća opterećenja javljati na strani korozijski postojanog čelika što nije opasno zbog veće duktilnosti materijala koju osigurava nikal [14].

Najbolja metoda za uklanjanje zaostalih naprezanja nastalih prilikom zavarivanja istorodnih čelika je žarenje, a što se tiče zavarenih spojeva iz raznorodnih čelika nakon takve toplinske obrade u fazi hlađenja opet dolazi do pojave napetosti zbog različitih toplinskih dilatacija raznorodnih čelika [15, 18].

4.4 Zavarivanje platiranih materijala

Platiranje je postupak nanošenja tankog sloja plemenitijeg materijala na nelegirane i mikrolegirane konstrukcijske čelike u svrhu postizanja antikorozivnog sloja. Na deblji osnovni materijal se zavaruje platiran sloj debljine od 3 – 7 mm, a to se izvodni toplim valjanjem, zavarivanjem eksplozijom ili se navaruje pod prahom. Platirani sloj može biti od CrNi legure, Cr nehrđajućih čelika, Ni – legure, Cu – legure i ostalo [1].

Zavarivanjem platiranih materijala potrebno je postići [1]:

- homogenost i kontinuitet platiranog sloja,
- otpornost na koroziju,
- mehanička svojstva moraju biti zadovoljavajuća za osnovni materijal i za platirani sloj.

Problemi kod zavarivanja i navarivanja platiranih slojeva su [1]:

a) Različita fizikalna svojstva:

- temperatura tališta,
- koeficijent linearnog toplinskog rastezanja,
- koeficijent provođenja topline,
- granica razvlačenja i ostala naprezanja.

b) Različita struktura i svojstva što uključuje moguću krhkost.

Dodatni materijal mora odgovarati mehaničkim svojstvima osnovnog materijala te antikorozivnim svojstvima platiranog sloja. Ako je dodatni materijal čvršći od osnovnog, zona taljenja će biti čvršća u ZUT-u i zoni taljenja (ZT) te će nastati visoka zaostala naprezanja te ako nema istežljivosti doći će do pukotina u ZT koje se mogu proširiti i do ZUT-a [1].

5 EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu diplomskog rada u svrhu definiranja tehnologije zavarivanja zavareni su osnovni materijali nelegiranog i visokolegiranog čelika različitim zaštitnim plinovima. Uzorci su zavareni MAG postupkom praškom punjenom žicom. Zavarivani su uzorci kutnog i sučeljenog spoja zaštitnim plinom C1 (100 % CO₂) i M21 (82 % Ar i 18 % CO₂) dok je za izradu korijena zavora sučeljenog spoja korištena keramička podloga. Kako bi se provjerila definirana tehnologija zavarivanja potrebno je bilo odrediti odgovarajuća razorna i nerazorna ispitivanja te ocijeniti svojstva zavarenog spoja. Cilj ovog eksperimenta je utvrditi razlike u kvaliteti zavora nelegiranih i visokolegiranih austenitnih čelika punom i praškom punjenom žicom te dobivene rezultate iskoristiti kao smjernice za primjenu u proizvodnji.

Pri zavarivanju uzoraka korištena je desna tehnika zavarivanja te su sapnice skraćene za 7 mm kako bi se smanjio slobodni kraj žice te time osigurao veći unos topline radi boljeg miješanja osnovnih materijala s dodatnim materijalom.

Uzorci su izrađeni u tvrtci Centrometal d.o.o. dok je izrezivanje ispitnih uzoraka i izrada makroizbrusaka presjeka zavora izvedena na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Laboratoriju za zavarivanje i Laboratoriju za zaštitu materijala.

5.1 Oprema i materijali korišteni za izradu eksperimentalnog dijela rada

5.1.1 Izvor struje

Izvor struje korišten pri izvođenju eksperimenta je ESS E4-4200 te je prikazan na slici 16. U tablici 7. su dane osnovne tehničke specifikacije izvora struje.

Tablica 7. Tehničke specifikacije izvora struje za zavarivanje ESS E4-4200 [23]

Raspon struje za MIG/MAG [A]	5 - 400
Raspon napona za MIG/MAG [V]	16 - 34
Intermitencija [40 °C]	100 % - 310 A
	60 % - 360 A
Napon praznog hoda [V]	20 - 64
Klasa izolacije	IP 23
Dimenzije v/d/š [mm]	1000 x 1100 x 500
Masa [kg]	110



Slika 16. Izvor struje ESS E4-4200

5.1.2 Specifikacija osnovnog materijala - nelegirani čelik

U tablici 8. su prikazana mehanička svojstva nelegiranog čelika, a u tablici 9. je prikazan njegov kemijski sastav. Podaci su uzeti iz certifikata osnovnog materijala S355J2 + N prema EN 10204:2004. Debljina osnovnog materijala iznosi 8 mm.

Tablica 8. Mehanička svojstva čelika S355J2 + N [24]

Temperatura ispitivanja [°C]	20
Granica razvlačenja [N/mm ²]	355
Vlačna čvrstoća [N/mm ²]	470
Istezanje A _S [%]	20

Tablica 3. Kemijski sastav čelika S355J2 + N [24]

Kemijski element	Udio elemenata [%]
C	0,17
Si	0,02
Mn	1,41
P	0,013
S	0,007
Al	0,031
Nb	0,005
V	0,005
Ni	0,090
Cr	0,060
Cu	0,040
Mo	0,010
Ti	0,005
N	0,008

5.1.3 Specifikacija osnovnog materijala - visokolegirani čelik

Mehanička svojstva osnovnog materijala visokolegiranog čelika prikazana su u tablici 9., dok je kemijski sastav prikazan u tablici 10. Podaci su uzeti iz atesta osnovnog visokolegiranog materijala 1.4301 X5CrNi18-10 prema EN 10204/3.1. Debljina osnovnog materijala iznosi 8 mm.

Tablica 9. Mehanička svojstva osnovnog materijala 1.4301 X5CrNi18 - 10 [25]

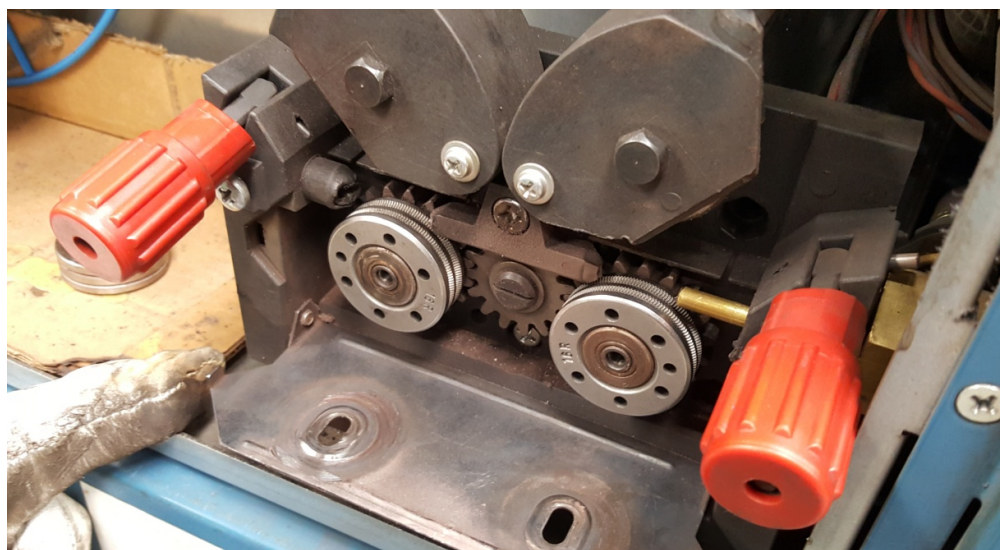
Temperatura ispitivanja [°C]	20
Granica razvlačenja [N/mm ²]	324
Vlačna čvrstoća [N/mm ²]	631
Istezanje A _S [%]	55

Tablica 10. Kemijski sastav čelika 1.4301 X5CrNi18 - 10 [25]

Kemijski element	Udio elemenata [%]
C	0,027
Si	0,440
Mn	1,430
P	0,030
S	0,004
Cr	18,02
Ni	8,00
N	0,070

5.1.4 Dodatni materijal

Kao dodatni materijal za zavarivanje uzoraka korišten je Boehler CN 23/12-FD prema EN ISO 17633-A. Radi se o praškom punjenoj žici promjera 1,2 mm. Za takvu vrstu dodatnog materijala potrebni su posebni pogonski kotači koji su orebreni kako bi se osigurao kontinuirani dovod dodatnog materijala. Praškom punjena žica je vrlo mekana te ne smije biti preveliki pritisak pogonskih kotača na žicu. Pogonski kotači su prikazani na slici 17. U tablici 11. i 12. nalaze se mehanička svojstva i kemijski sastav dodatnog materijala.



Slika 17. Vodeći kotači za praškom punjenu žicu

Tablica 11. Mehanička svojstva dodatnog materijala prema EN 10204-3.1 [26]

Promjer žice [mm]	1,2
Temperatura ispitivanja [°C]	20
Granica razvlačenja [N/mm ²]	≥ 350
Vlačna čvrstoća [N/mm ²]	≥ 520
Istezanje [%]	≥ 30
Udarni rad loma [KV/J]	≥ 45

Tablica 12. Kemijski sastav dodatnog materijala [26]

Kemijski element	Udio elemenata [%]
C	0,02
Si	0,61
Mn	1,42
P	0,019
S	0,010
Cr	23,39
Mo	0,02
Ni	12,41
Cu	0,06

5.1.5 Zaštitni plin

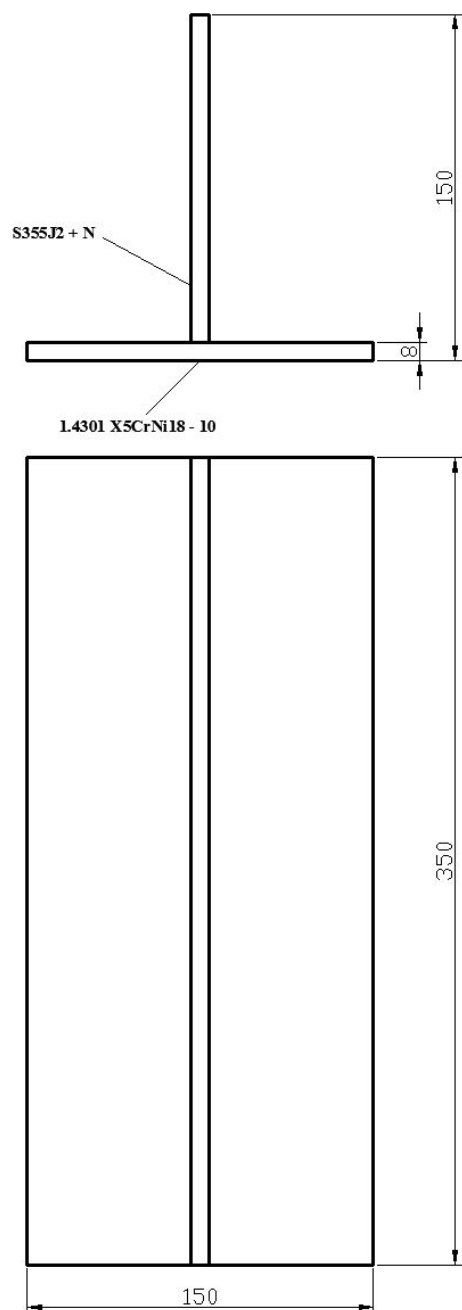
Za izradu svih uzoraka korištene su dvije vrste zaštitnog plina, a to su zaštitni plin M21 prema normi HRN EN ISO 14175, mješavine 82 % Ar i 18 % CO₂ i zaštitni plin C1, ≥ 99,995 % CO₂ prema normi HRN EN ISO 14175. Čeoni i kutni uzorci su zavarivani s oba zaštitna plina. Protok plina u oba slučaja je iznosio 15 l/min kako je prikazano na slici 18.



Slika 18. Provjera protoka plina

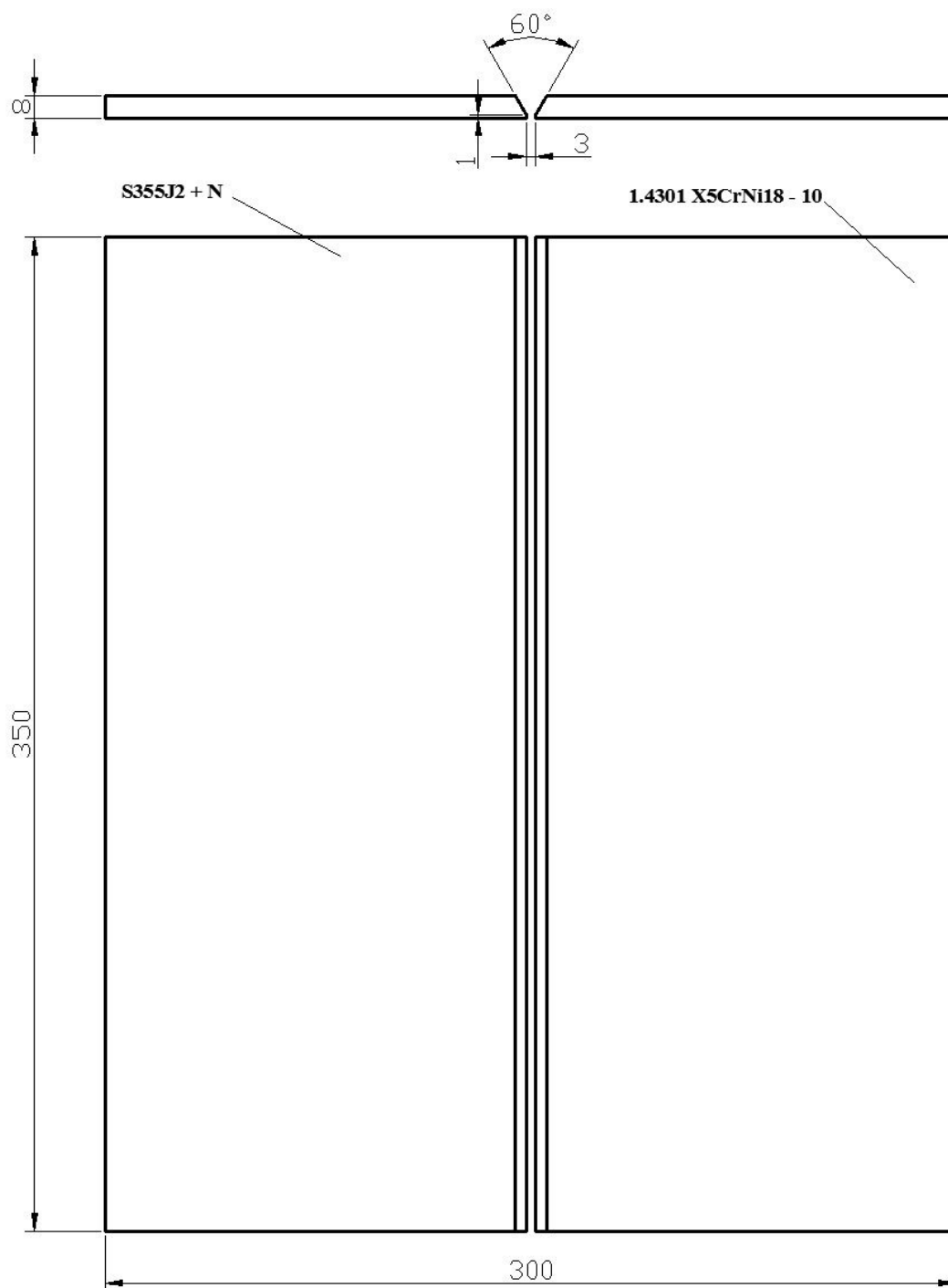
5.2 Zavarivanje uzoraka

Osnovni materijali izrezani su postupkom laserskog rezanja. Na slici 19. je prikazana priprema kutnog zavora kao i same dimenzije uzorka.



Slika 19. Priprema i dimenzije uzorka, kutnog spoja

Korijen zavora zavaren je pomoću keramičke podloge koja drži talinu zbog većeg razmaka između osnovnih materijala. Osnovni materijali izrezani su pomoću laserskog rezanja, a priprema zavora je izrađena na vertikalnoj glodalici. Na slici 20. je prikazana priprema sučeljenog zavora i dimenzije samog uzorka.



Slika 20. Priprema i dimenzije uzorka, čeonog spoja

Kao što je prethodno navedeno, ispitni uzorci su zavarivani s MAG postupkom zavarivanja praškom punjenom žicom. Zavarena su dva primjerka kutnog zvara, ali različitim zaštitnim plinom te dva sučeljena uzorka također različitim zaštitnim plinom. Svi uzorci su zavareni desnom tehnikom rada. U tablicama 13. i 14. dani su parametri zavarivanja ispitnih uzoraka kutnog i sučeljenog spoja.

Tablica 13. Parametri zavarivanja uzoraka kutnog spoja

	Kutni spoj, uzorak A	Kutni spoj, uzorak C
Vrsta plina	C1 (100 % CO ₂)	M21 (82/18)
Jakost struje [A]	249	239
Napon [V]	29	29
Protok plina [l/min]	15	15
Brzina žice [m/min]	9,7	9,4
Brzina zavarivanja [cm/min]	19	19
Unos topline [kJ/cm]	19,38	18,60

Tablica 14. Parametri zavarivanja uzoraka sučeljenog spoja

	Sučeljeni spoj, uzorak B		Sučeljeni spoj, uzorak D	
Vrsta plina	C1 (100 % CO ₂)		M21 (82/18)	
	korijen zavora	drugi prolaz	korijen zavora	drugi prolaz
Jakost struje [A]	215	225	205	225
Napon [V]	21	28,5	20,5	28,5
Protok plina [l/min]	15	15	15	15
Brzina žice [m/min]	8,8	9	8,6	9
Brzina zavarivanja [cm/min]	24	23	24	23
Unos topline [kJ/cm]	9,60	14,41	8,93	14,22

Unos topline je vrlo bitan kod zavarivanja te se izračunava prema sljedećem izrazu:

$$Q = \frac{U \times I \times 60}{v_Z \times 1000} \times \eta \text{ [kJ/cm]} \quad (2)$$

U – napon zavarivanja [V]

I – jakost struje zavarivanja [A]

v_Z – brzina zavarivanja [cm/min]

η – stupanj iskorištenja (ovisi o postupku zavarivanja - za MAG, praškom punjenom žicom iznosi 0,85)

Na slici 21. je prikazano zavarivanje uzorka kutnog spoja. Razmak između ploča kod sučeljenog spoja je iznosio 3 mm, limovi su pričvršćeni i fiksirani pomoću tanjih i manjih limova te je korištena keramička podloga za zavarivanje korijena zavora. Na slici 22. prikazano je zavarivanje korijena zavora sučeljenog spoja.



Slika 21. Zavarivanje uzorka kutnog spoja



Slika 22. Zavarivanje korijena zavora sučeljenog spoja

5.3 Nerazorno ispitivanje uzoraka penetrantima

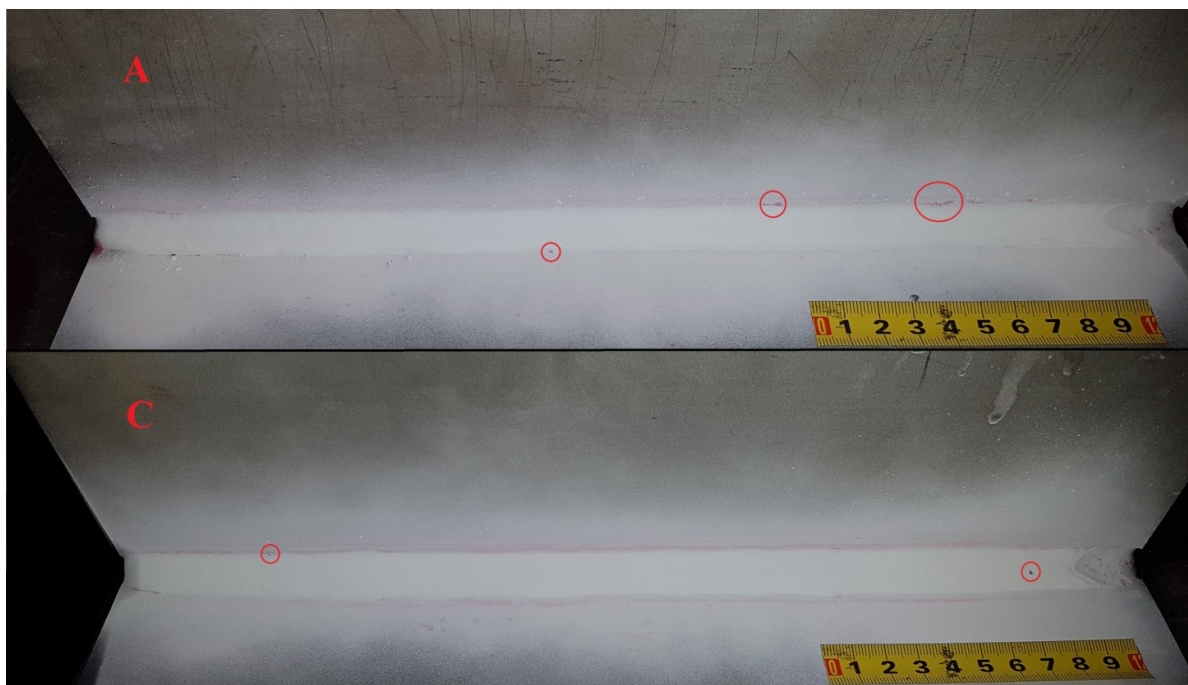
Svi uzorci su ispitani penetrantima. Ova metoda ispitivanja omogućava otkrivanje površinskih nepravilnosti što se odnosi samo na nepravilnosti koje su otvorene prema površini, a u nekim slučajevima i otkrivanje propusnosti. Postupak se provodi pomoću penetranta, odstranjivača i razvijača. Postupak je vrlo jednostavan te se sve indikacije nepravilnosti brzo uočavaju na površini.

Tehnika ispitivanja penetrantima može se dijeliti prema:

- **obojenosti penetranta:** obojeni (crveni) ili fluorescentni
- **odstranjivanju viška penetranta s površine:** vodom perivi penetranti (VPP), poslije emulgirajući penetranti (PEP) i otapalom odstranjivi penetranti (OOP)
- **prema osjetljivosti:** stupnjevi (1, 2, 3)

Ispitivanje je vršeno obojenim vodoperivim penetrantom crvene boje. Površina uzoraka je prvo očišćena odstranjivačem te je na površinu nanesen penetrant. Vrijeme penetriranja je iznosilo 15 minuta te je višak penetranta ispran vodenim mlazom. Nakon ispiranja je nanesen razvijač i vrijeme razvijanja je iznosilo 5 minuta. Na slici 23. su prikazani uzorci kutnog spoja, dok su na slici 24. uzorci sučeljenog spoja nakon provedenog ispitivanja penetrantima.

Vidljivo je da nema pojave većih pukotina na sva četiri uzoraka, ali je došlo do par manjih indikacija kod kutnih spojeva koje su premale da bi se razmatrale. Nepravilnosti na uzorcima kutnih spojeva su označene na slici 23.



Slika 23. Uzorci kutnog spoja nakon ispitivanja penetrantima, gornji - A, donji - C



Slika 24. Uzorci sučeljenog spoja nakon ispitivanja penetrantima, gornji - B, donji - D

5.4 Nerazorno ispitivanje

Radiografija je metoda nerazornog ispitivanja zavara ili nekih drugih dijelova ili sklopova prolaskom ionizirajućeg zračenja. Metoda se temelji na razlikama u apsorpciji zračenja prilikom prolaska kroz materijal. Svaki materijal apsorbira različitu količinu zračenja te količina apsorbiranog zračenja ovisi o njegovom atomskom broju. Svjetlije površine na radiogramu označavaju veću apsorpciju zračenja u materijal što označava deblji materijal. Radiografskom metodom moguće je detektirati uključke koji spadaju u volumne nepravilnosti, poroznost, pore, naljepljivanje te pukotine. Pukotine koje su horizontalne u odnosu na prolaz zračenja nisu vidljive na radiogramu, dok su vertikalne vidljive. Kao izvori zračenja koriste se X zrake, pomoću rendgen uređaja i gama zrake gdje se koriste radioaktivni izotopi kao izvor ionizirajućeg zračenja (kobalt, iridij, selen i ostali.). Gama zrake imaju veću prodornost u odnosu na X zrake te se koriste pretežito za deblje materijale.

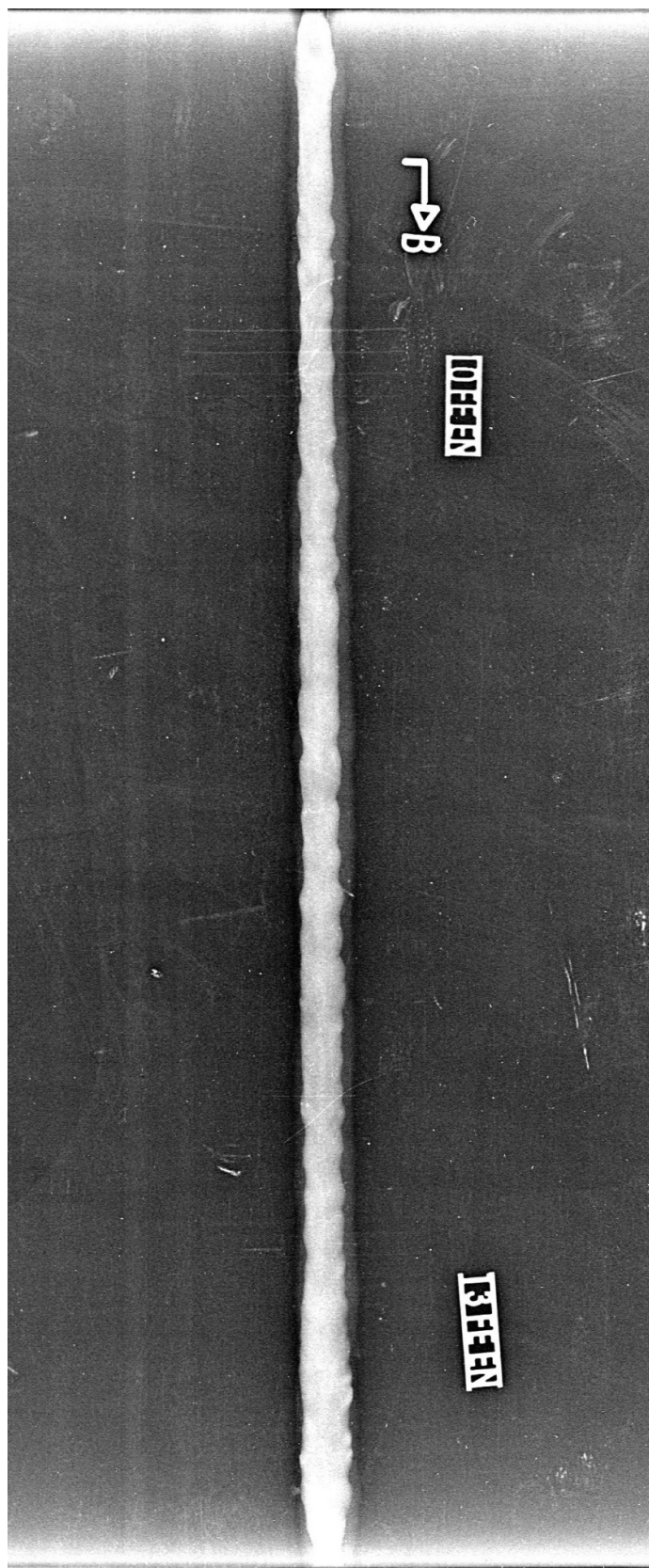
Uzorci sučeljenog zavarenog spoja su podvrgnuti radiografskoj metodi ispitivanja. Snimanje rendgenskim uređajem izvršeno je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Laboratoriju za nerazorna ispitivanja. Za dobivanje radiografskog zapisa korištena je "slika na ploči" pomoću koje dobivamo digitalnu sliku istim principom kao kod filma. Nakon snimanja, digitalni film se stavlja u skener koji nam omogućava spremanje radiografske snimke na računalo. Prije samog snimanja na uzorak se stavlja indikator koji sadrži žice različitih promjera te na osnovu promjera zadnje vidljive žice na radiografskom zapisu se određuje osjetljivost snimanja.

Parametri rendgenskog uređaja prilikom snimanja su: ekspozicija 8 mA min, ali zbog digitalnog filma ekspoziciju je trebalo smanjiti za 50 % (4 mA min), napon 150 kV te vrijeme ekspozicije 2 min. Udaljenost fokus - film je iznosila 700 mm. Na slici 25. je prikazan pripremljeni uzorak za snimanje.

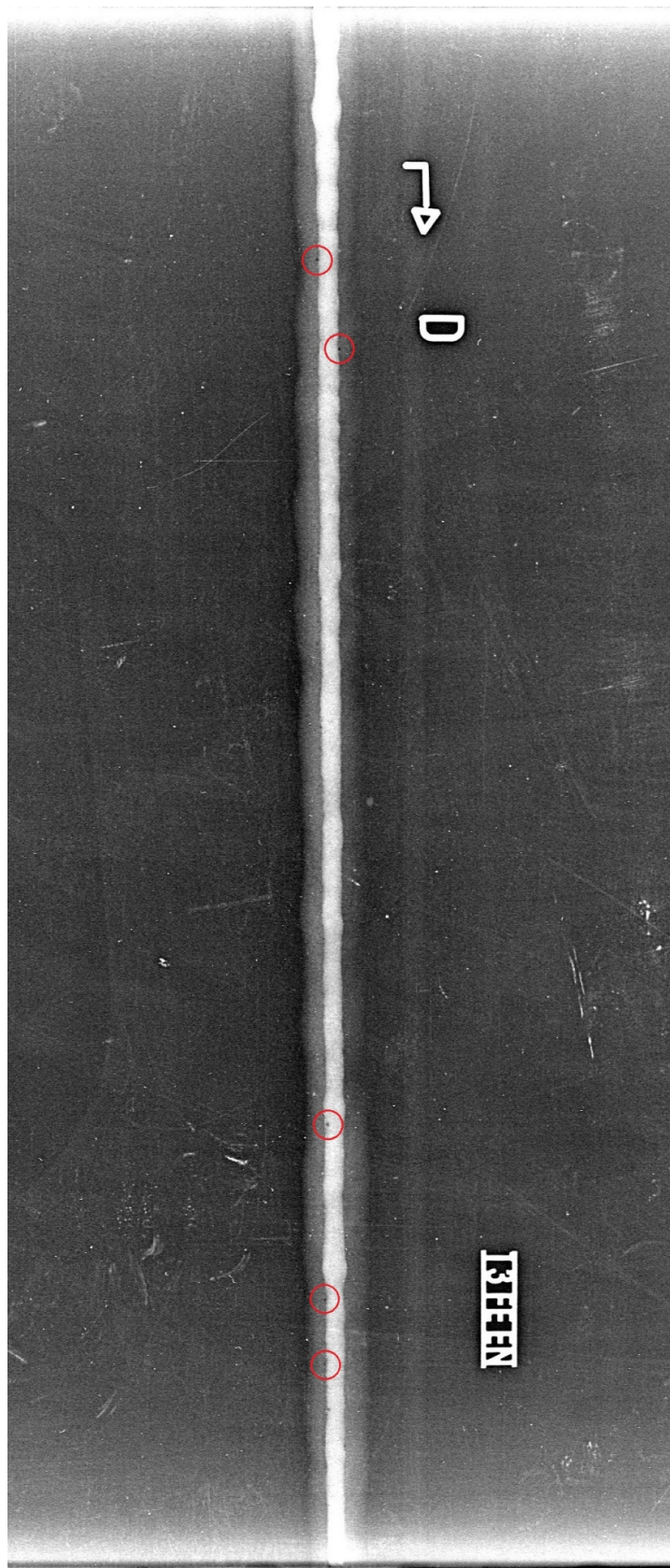


Slika 25. Uzorak pripremljen za rendgensko snimanje X zrakama

Na slici 26. i 27. su prikazani radiogrami sučeljenih uzoraka B i D. Iz radiografskih zapisa vidljivo je da nije došlo do pojave pora, toplih ili hladnih pukotina. Kod uzorka D je vidljivo da ima par uključaka koji su označeni na radiogramu (slika 27). Nastanak tih uključaka može biti zbog zaostale troske u korijenu zavora koja nastaje zbog praškom punjene žice. Također je vidljivo da je zavar uzorka D jednoličniji u odnosu na uzorak B te da je zavar uzorka B veće širine u odnosu na zavar uzorka D zbog različitih parametara zavarivanja korijena zavora. Na temelju radiografskih snimki može se zaključiti da nema značajnijih nepravilnosti u zavarenom spoju te da je zavareni spoj u oba uzorka izveden kvalitetno.



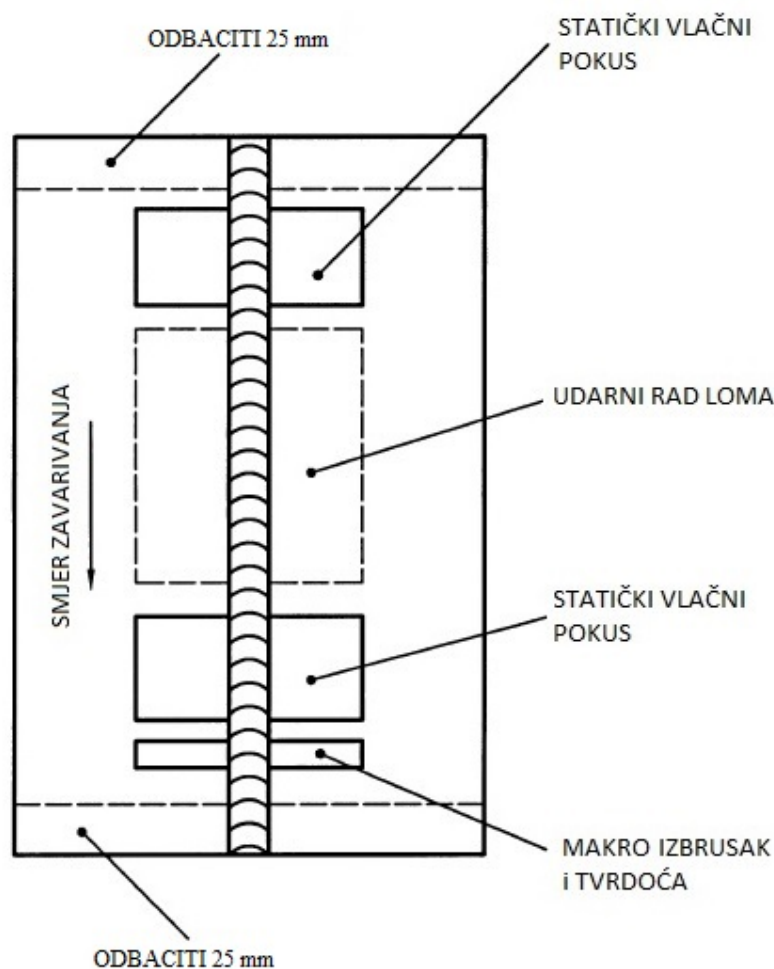
Slika 26. Radiogram Uzorka B



Slika 27. Radiogram Uzorka D

5.5 Ispitivanje mehaničkih svojstva zavarenih spojeva

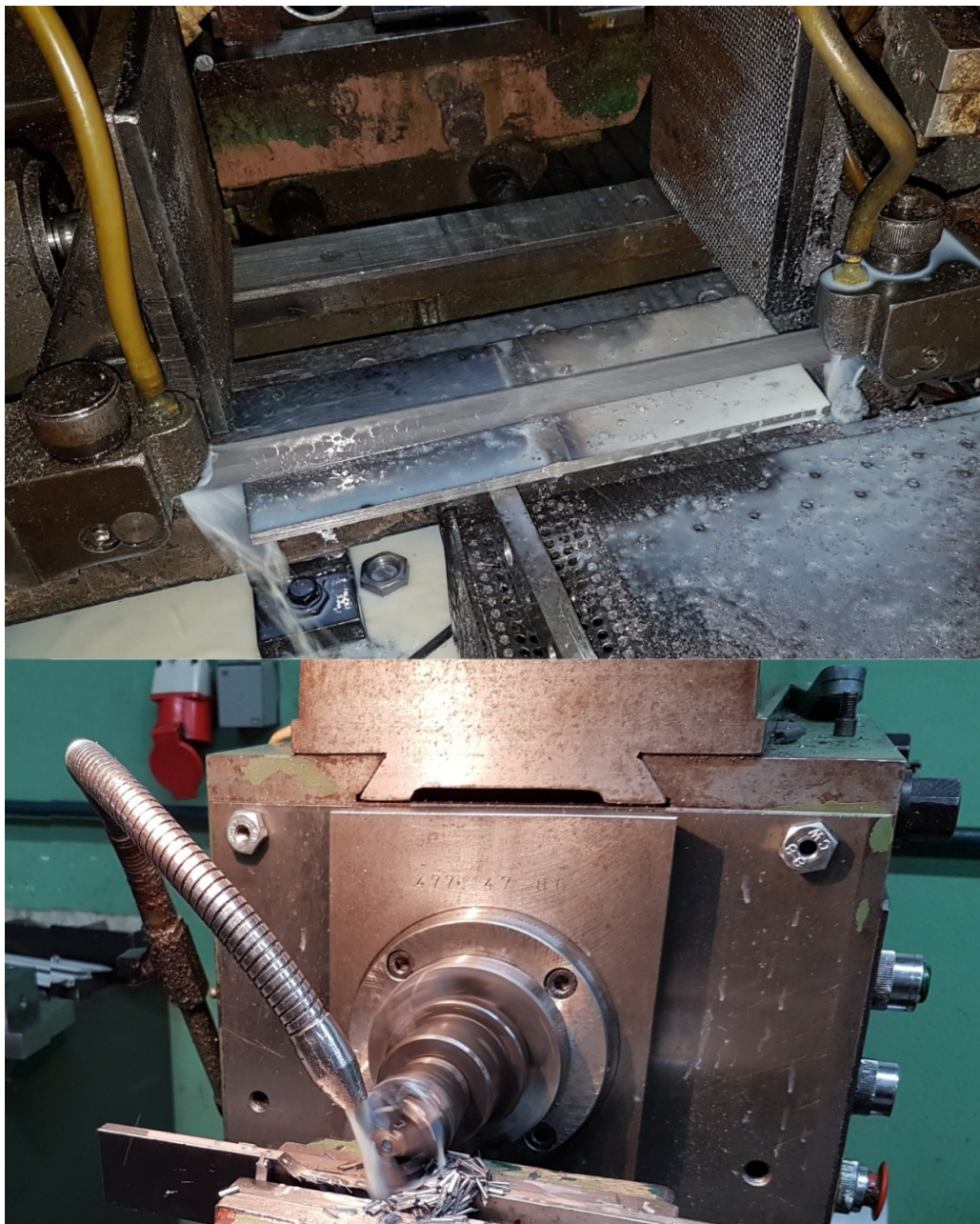
Ispitivanja mehaničkih svojstava zavarenih spojeva uzoraka su vršena prema normi HRN EN ISO 15614-1. Prema normi minimalne širine ispitnih ploča trebaju iznositi 150 mm te minimalne dužine 350 mm. Za statički vlačni pokus pripremljene su po dvije epruvete iz svakog sučeljenog uzorka (B, D), a za savijanje po četiri epruvete za svaki sučeljeni uzorak, dvije za lice zavora i dvije za korijen zavora. Izrađeni su makroizbrusci po jedan primjerak za sva četiri uzorka. Slika 28. prikazuje raspored uzoraka za mehanička ispitivanja.



Slika 28. Prikaz mjesta vađenja uzoraka za mehanička ispitivanja [27]

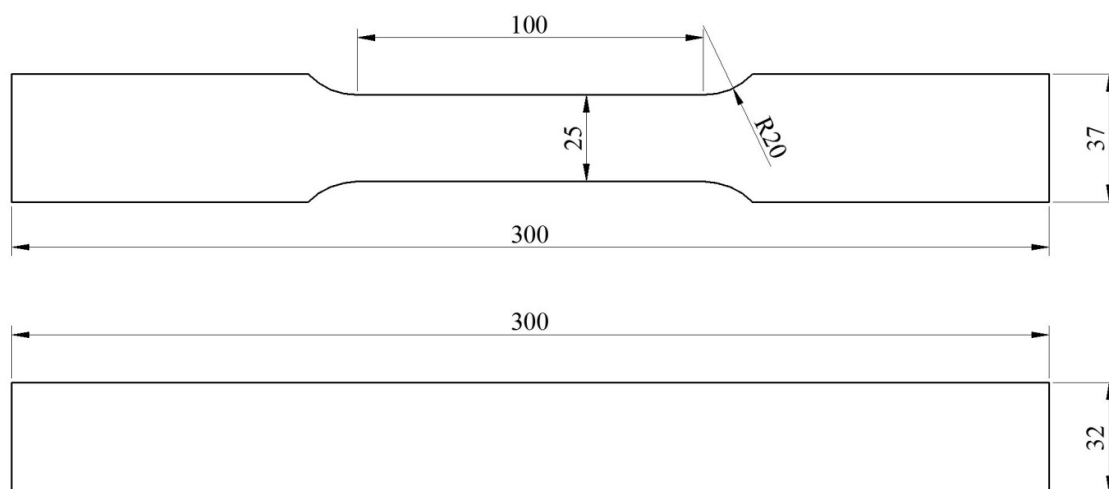
5.5.1 Izrada epruveta za statički vlačni pokus

Iz uzoraka sučeljenog spoja bilo je potrebno izraditi ispitne epruvete prema normi HRN EN ISO 4136:2013 za statički vlačni pokus te epruvete za savijanje prema normi HRN EN ISO 5173:2010. Epruvete su prvo izrezane na kružnoj pili te su za statičko vlačni pokus još naknadno glodane na točne dimenzije u tvrtci Centrometal d.o.o. Rezanje i glodanje uzoraka je prikazano na slici 29.



Slika 29. Rezanje uzoraka - gore, glodanje epruveta - dolje

Dodatno je bilo potrebno izbrusiti nadvišenja zavora na licu i korijenu što je bilo izvršeno na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Laboratoriju za zavarivanje. Na slici 30. su dane dimenzije epruveta za statičko vlačni pokus i savijanje.



Slika 30. Dimenzije epruveta, statičko vlačni pokus - gornja epruveta, savijanje - donja epruveta

5.5.2 Statički vlačni pokus

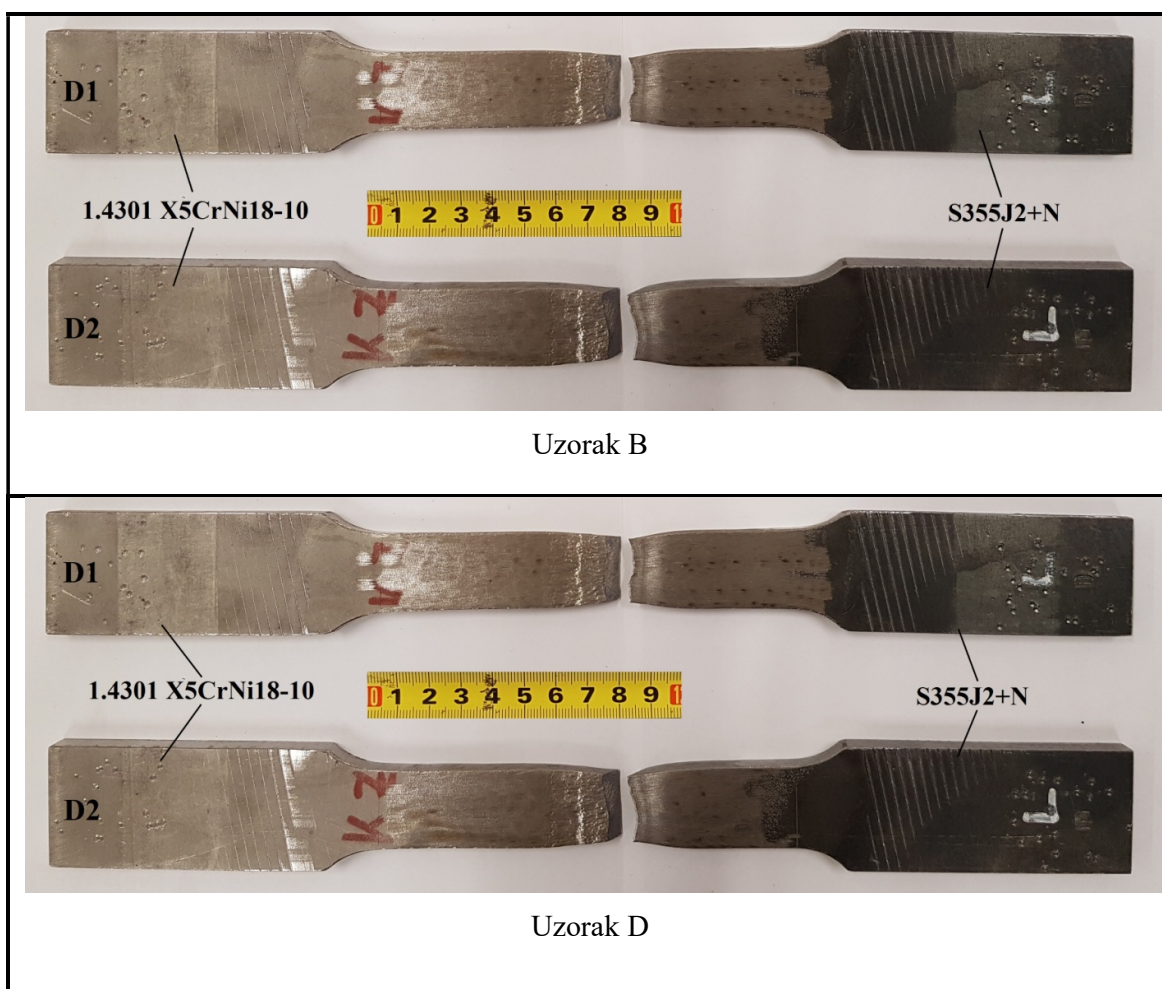
Statički vlačni pokus izvršen je u Laboratoriju za mehanička ispitivanja materijala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Za provedbu pokusa korištena je kidalica WPM EU 40 MOD (slika 31.), koja može postići maksimalnu silu od 400 kN. Istezanjem epruvete sve do loma dobiveni su rezultati vlačne čvrstoće svakog uzorka.



Slika 31. Kidalica WPM EU 40 MOD

Mjerenje vlačne čvrstoće izvršeno je na oba uzoraka sučeljenog spoja po dva primjerka. U tablici 14. je vidljivo da su sve epruvete puknule u osnovnom materijalu S355J2+N što znači da su zavareni spojevi uzoraka zadovoljavajuće izvedeni.

Tablica 15. Epruvete nakon provedbe statičko vlačnog pokusa



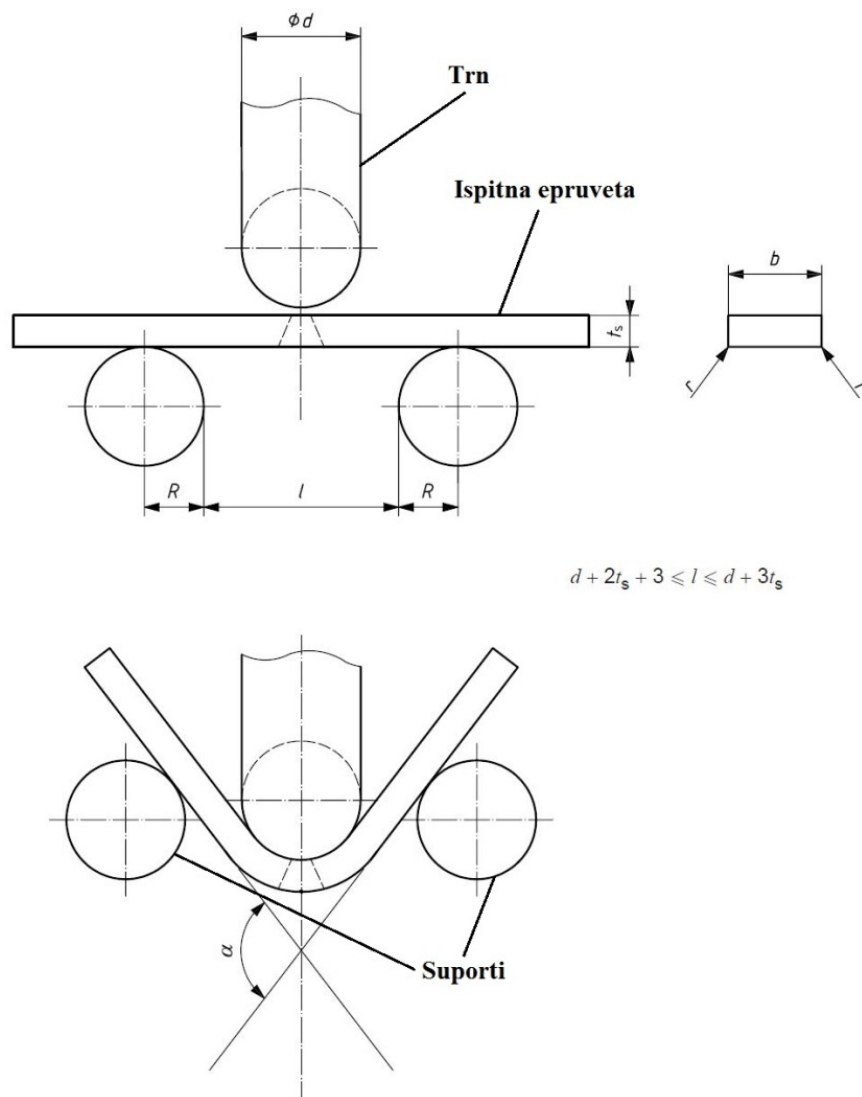
Tablica 16. Rezultati statičkog vlačnog pokusa

Epruvete	R_m [N/mm ²]	F_m [kN]	Mjesto puknuća
uzorak B, epruveta 1	518,77	99,046	osnovni materijal S355J2+N
uzorak B, epruveta 2	533,00	102,088	osnovni materijal S355J2+N
uzorak D, epruveta 1	529,37	100,592	osnovni materijal S355J2+N
uzorak D, epruveta 2	528,69	99,235	osnovni materijal S355J2+N

U tablici 15. su rezultati statičkog vlačnog pokusa te je vidljivo da nema značajnih razlika između dobivenih rezultata vlačne čvrstoće kao i sile kidanja. Pošto su sve epruvete puknule u osnovnom materijalu S355J2+N može se zaključiti da su zavari kvalitetno izveden na svim uzorcima sučeljenih spojeva.

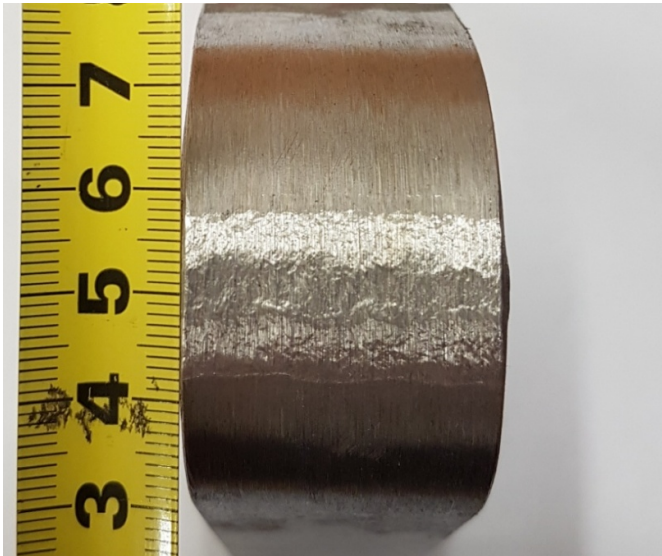
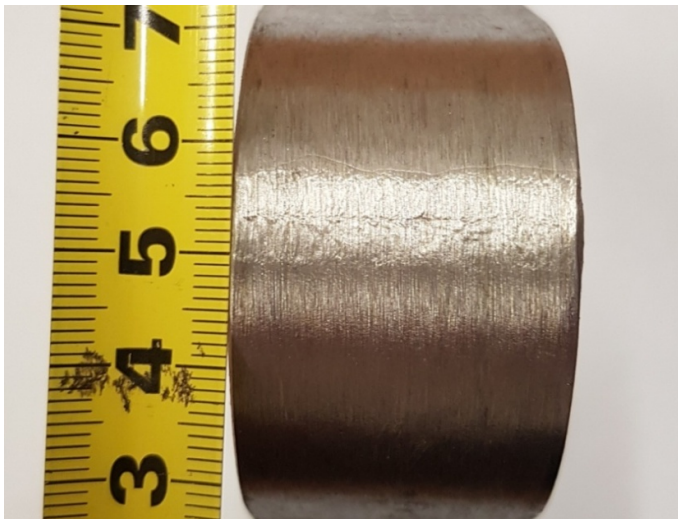
5.5.3 Ispitivanje savijanjem

Ispitivanje savijanjem je izvršeno u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Oba uzorka sučeljenog spoja su ispitana poprečnim savijanjem na lice zavara i na korijen zavara prema HRN EN ISO 5173:2010. U tablici 16. su rezultati ispitivanja savijanjem uzorka B, a u tablici 17. su rezultati ispitivanja savijanjem uzorka D. Ispitane su po dvije epruvete na lice zavara i dvije epruvete na korijen zavara za svaki uzorak. Rezultati epruveta svakog uzorka za lice i korijen zavara su identični te su u tablicama prikazane po jedan primjer epruveta za svaki uzorak.

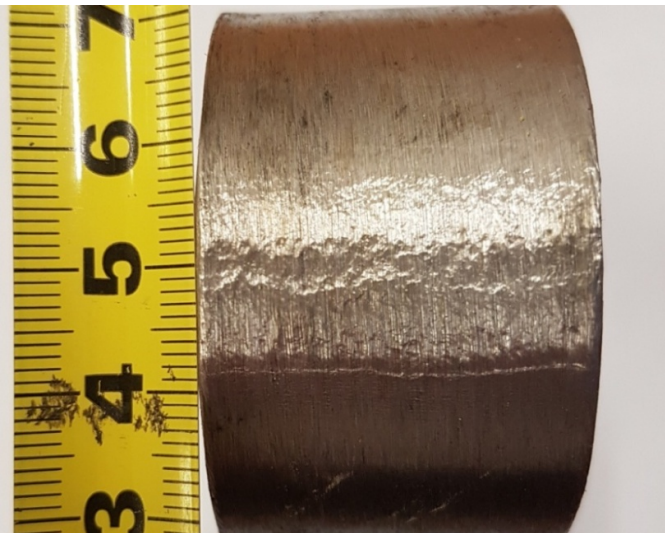
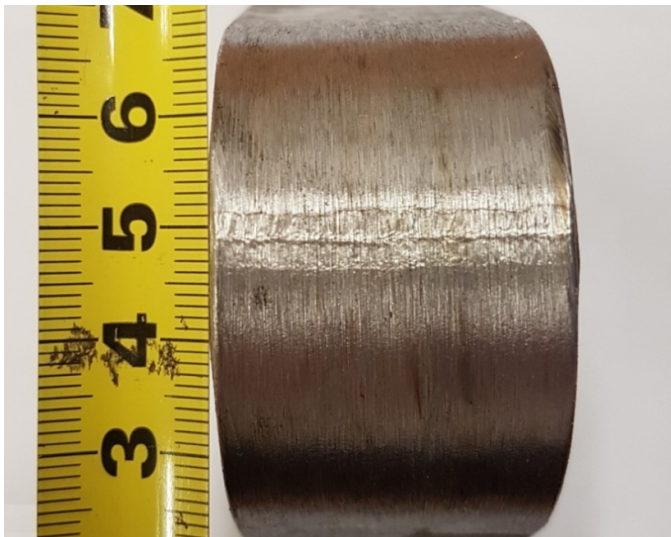


Slika 32. Shema ispitivanja savijanjem prema HRN EN ISO 5173:2010 [28]

Tablica 17. Rezultati ispitivanja savijanjem Uzorka B

UZORAK B		
Poprečno savijanje lica zavara		
Oznaka epruvete	BL	
Dužina epruvete [mm]	300	
Širina epruvete [mm]	32	
Promjer trna [mm]	36	
Razmak između suporta [mm]	65	
Kut savijanja [°]	180	
Poprečno savijanje korijena zavara		
Oznaka epruvete	BK	
Dužina epruvete [mm]	300	
Širina epruvete [mm]	32	
Promjer trna [mm]	36	
Razmak između suporta [mm]	65	
Kut savijanja [°]	180	

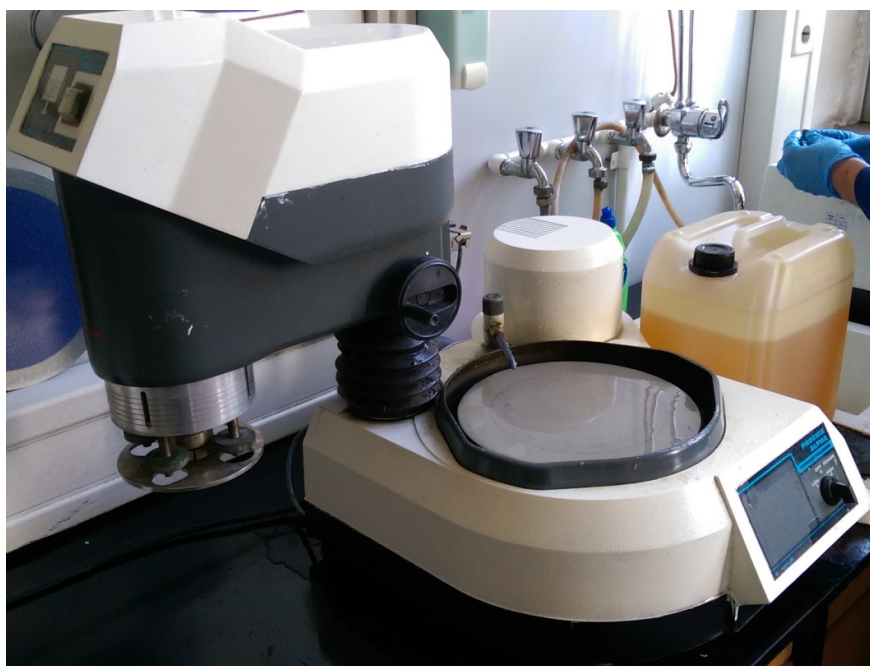
Tablica 18. Rezultati ispitivanja savijanjem Uzorka D

UZORAK D		
Poprečno savijanje lica zavara		
Oznaka epruvete	DL	
Dužina epruvete [mm]	300	
Širina epruvete [mm]	32	
Promjer trna [mm]	36	
Razmak između suporta [mm]	65	
Kut savijanja [°]	180	
Poprečno savijanje korijena zavara		
Oznaka epruvete	DK	
Dužina epruvete [mm]	300	
Širina epruvete [mm]	32	
Promjer trna [mm]	36	
Razmak između suporta [mm]	65	
Kut savijanja [°]	180	

Na uzorcima nije došlo do pukotina u zavaru nakon savijanja te se može zaključiti da su zavari kvalitetno izvedeni.

5.6 Makro analiza i geometrija zavora

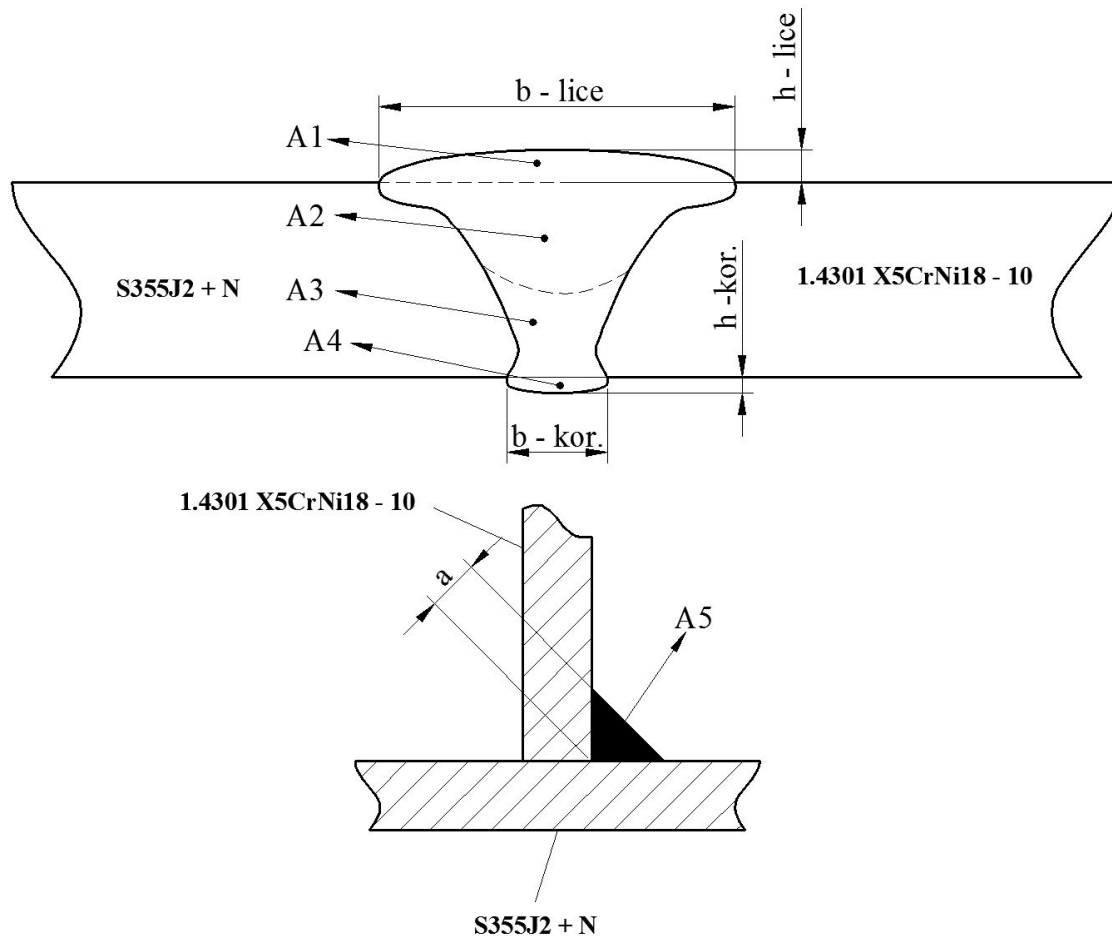
Nakon izrezivanja uzoraka u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, dobiveni izrezani uzorci su polirani na stroju u Laboratoriju za materijalografiju. Poliranje je provedeno tako što se na stol od stroja koji rotira stavlja brusni papir od silikon-karbida (SiC). Brzina vrtnje brusnog papira, u ovom slučaju 300 min^{-1} , dobiva se na temelju propisane brzine brušenja. Prvo brušenje se vrši brusnim papirom hrapavosti 360, nakon toga se vrši brušenje brusnim papirom hrapavosti 500 te brušenje i poliranje slijedi redom hrapavošću: 1200, 2000, 4000. Brušenje i poliranje se vrši uz pomoć vode koja hladi, ujedno i ispire izbrušeni otpad. Na slici 33. prikazan je stroj za poliranje izrezanih ispitnih uzoraka.



Slika 33. Stroj za poliranje izrezanih ispitnih uzoraka

Za dobivanje makroizbrusaka nakon brušenja uzorke je bilo potrebno još elektrolitski nagristi u kromovoj kiselini (10 g CrO_3 u $100 \text{ ml H}_2\text{O}$) u Laboratoriju za zaštitu materijala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Proces elektrolitskog nagrivanja trajao je 2 min pod naponom od 4 V te jakosti struje 2 A.

Geometrija zavora izmjerena je uz pomoć računalnog programa ImageJ. Dimenzije geometrije zavora izmjerene su na sva četiri uzorka, te su prikazane u tablicama 19. i 20. dok su na slici 34. i tablici 18. prikazana mjerene veličine zavora i njihove oznake.

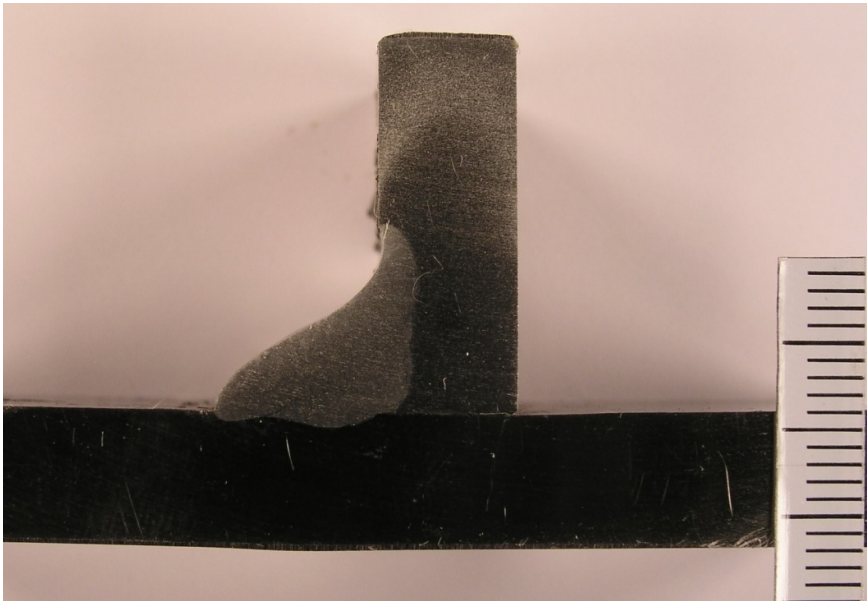



Slika 34. Mjerene veličine zavora


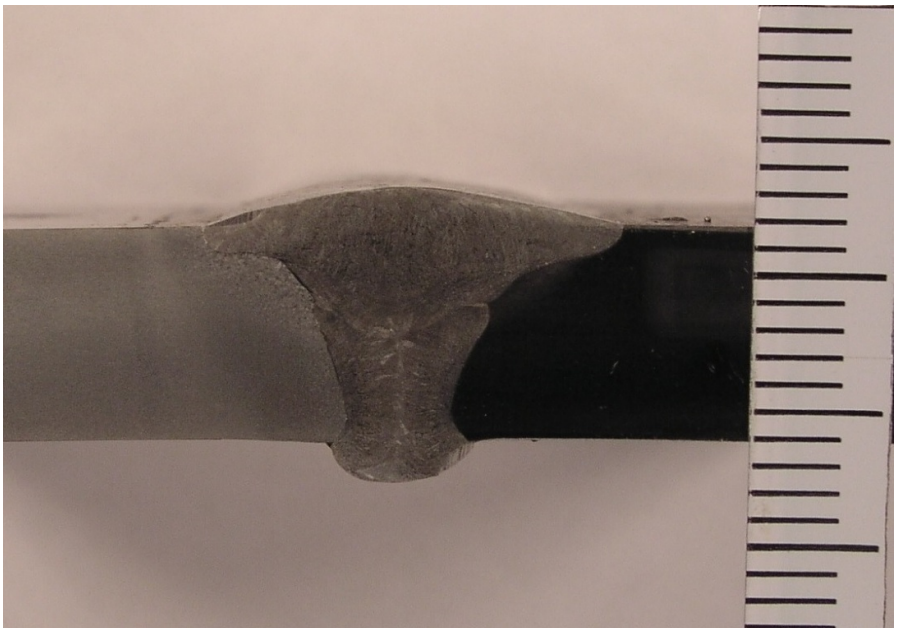
Tablica 19. Oznake mjerne veličine zavora

Oznaka	Značenje oznake	Mjerna jedinica
a	visina zavora kutnog spoja	mm
b - lice	širina lica zavora sučeljenog spoja	mm
b - kor.	širina korijena zavora sučeljenog spoja	mm
h - lice	visina lica zavora sučeljenog spoja	mm
h - kor.	visina korijena zavora sučeljenog spoja	mm
A1	površina presjeka nadvišenja lica zavora sučeljenog spoja	mm ²
A2	površina presjeka zavora 2. prolaza sučeljenog spoja	mm ²
A3	površina presjeka korijena zavora sučeljenog spoja	mm ²
A4	površina presjeka nadvišenja korijena zavora	mm ²
A5	površina presjeka zavora kutnog spoja	mm ²

Tablica 20. Makroizbrusci uzoraka kutnih spojeva

Oznaka uzorka	a [mm]	A5 [mm ²]
	6,5	67,5
A		
	6,6	59,8
C		

Tablica 21. Makroizbrusci uzoraka sučeljenog spoja

Oznaka uzorka	b - lice [mm]	b - kor. [mm]	h - lice [mm]	h - kor. [mm]	A1 [mm ²]	A2 [mm ²]	A3 [mm ²]	A4 [mm ²]
	14,7	10,7	0,7	2	7,9	50,5	43,5	17,5
B								
	15,5	5,3	1,5	1,6	14,2	48,4	28	6,2
D								

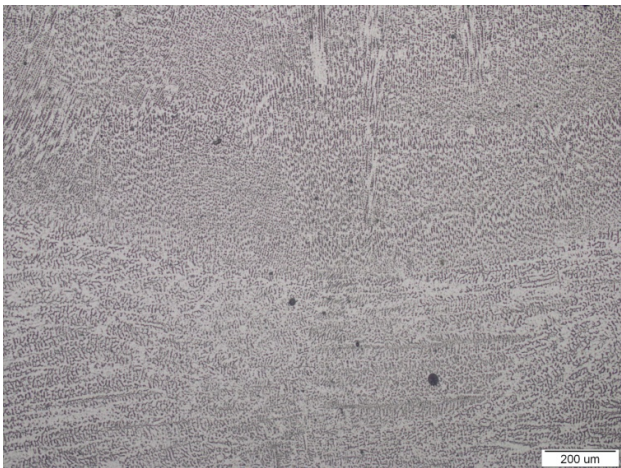
Kod uzorka A koji je zavarivan C1 zaštitnim plinom došlo je do zadovoljavajućeg miješanja na stranama obiju zavarenog spoja. Kod uzorka C, koji je zavarivan M21 zaštitnim plinom je također došlo do miješanja na stranama osnovnih materijala, ali se vidi nešto slabije miješanje na samomu spoju osnovnih materijala. Razlike u profilu zavarenog spoja moguće je pripisati utjecaju zaštitnog plina. Naime zaštitni plin C1 zbog svojih svojstava omogućava veći unos topline tijekom zavarivanja te je na uzorku A došlo do boljeg miješanja osnovnih i dodatnog materijala.

Kod uzoraka B i D je došlo do prihvatljivog miješanja na obiju strana osnovnih materijala. Iz tablice 20. je uočljiva manja širina korijena zavara u odnosu na uzorak B. Korijen zavara kod uzorka D je zavarivan s smanjenom jakosti struje od 10 A te je zavarivan s zaštitnim plinom M21 koji rezultira nešto manjim unosom topline time, a time i manjom širinom korijena zavara bez obzira što su se koristile podjednake keramičke podloge.



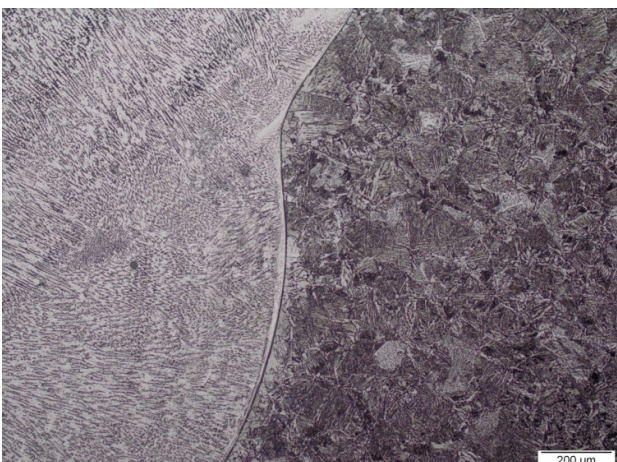
5.7 Mikrostrukture zavarenih spojeva

U tablici 21. i 22. prikazane su mikrostrukture metala zavara za uzorke sučeljenog spoja B i D te mikrostruktura linije staljivanja za uzorak D na strani austenitnog čelika i ugljičnog.

Tablica 22. Mikrostruktura sučeljenog uzorka B

Uzorak	Područje zavarenog spoja
B	Metal zavara
	

Tablica 23. Mikrostrukture sučeljenog uzorka D

Uzorci	Područje zavarenog spoja
D	Metal zavara
	
D	Linija staljivanja na strani osnovnog materijala 1.4301
	
D	Linija staljivanja na strani osnovnog materijala S355J2+N
	

Moguće je uočiti veću količinu uključaka u metalu zavara uzorka B, zavarivanog C1 zaštitnim plinom u odnosu na uzorak D, zavarivanog s M21 zaštitnim plinom. Prilikom zavarivanja pod C1 zaštitnim plinom postoji veća vjerojatnost za pojavu uključaka u metalu zavara. Kod linije staljivanja na strani osnovnog materijala S355J2 uzorka D vidljiva je grubo zrnata mikrostruktura na strani ugljičnog osnovnog materijala u odnosu na austenitni materijal. Linija staljivanja kod uzorka D na strani osnovnog materijala S355J2 je jasnije definirana u odnosu na liniju staljivanja s strane osnovnog materijala 1.4301.

5.8 Feritni broj

Određivanje feritnog broja, tj. postotak ferita u zavaru vrši se pomoću uređaja: Institut Dr. Foerster Reuntligen Ferritgehaltmesser 1.054 koji je prikazan na slici 35. Uređaj sadrži ticalo koje prislanjanjem na željena mjesta očitava postotak ferita u materijalu. Uređaj se kalibrira pomoću etalona koji sadrži točno 9,8 % F.

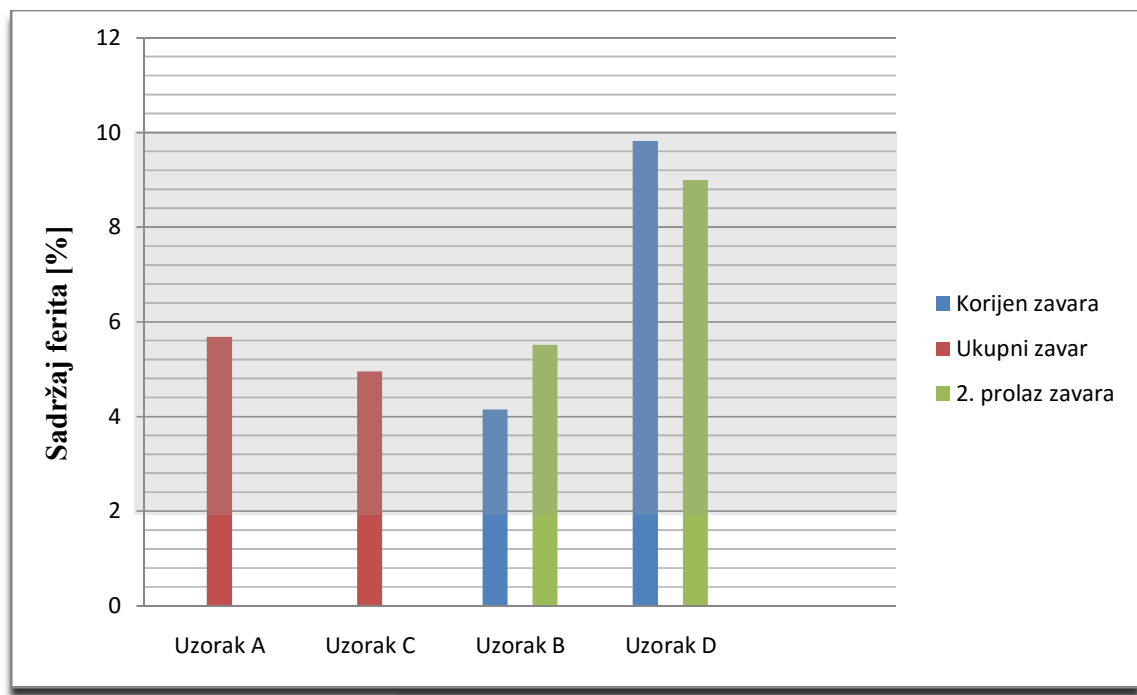


Slika 35. Uređaj za mjerenje feritnog broja

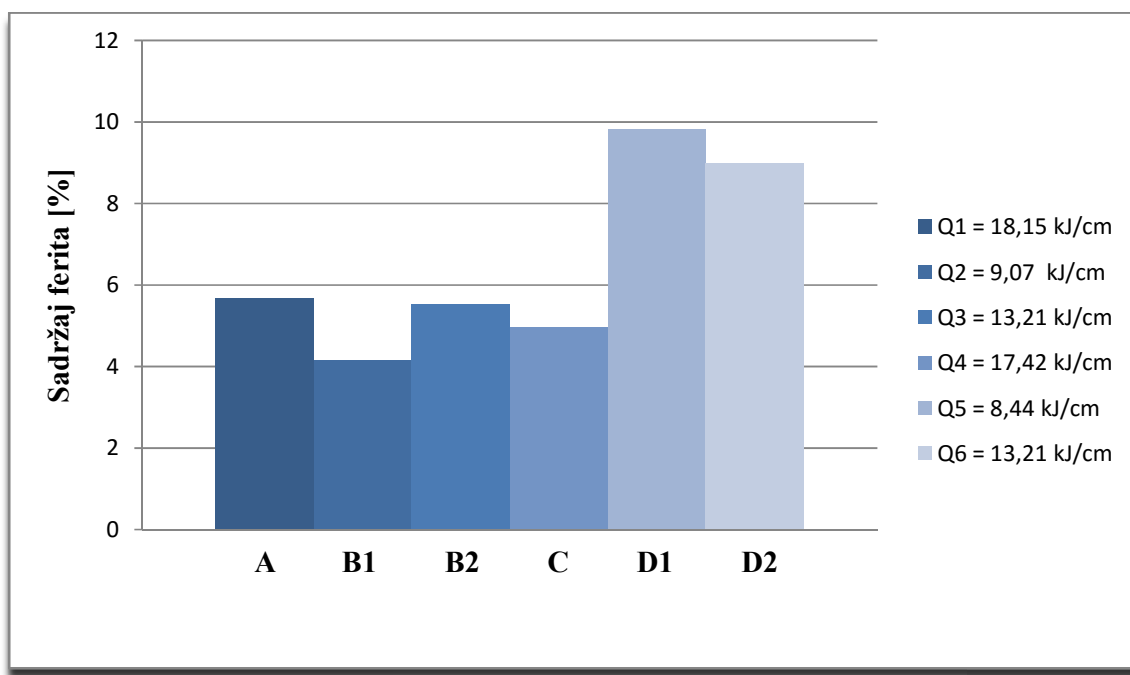
Udio ferita izmjeren je u metalu zavara kod svih uzoraka. Izmjeren je na 5 mjesta svakog metala zavara te je izračunata aritmetička sredina što je prikazano u tablici 23. Slika 36. prikazuje grafički prikaz udjela ferita u pojedinom metalu zavara te osjenčano područje označava prihvatljiv udio ferita, dok je na slici 37. prikazan grafički prikaz udjela ferita za pojedinog stanja pokusa. Metali zavara Uzorka D imaju veći postotak ferita u odnosu na metale zavara uzorka B. Može se zaključiti da je do toga došlo zbog manje širine zavara uzorka D što znači i manja količina dodatnog materijala u metalu zavara koji je austenitni.

Tablica 24. Izmjerene vrijednosti feritnog broja

Uzorci		Sadržaj ferita u metalu zavora					Σ	Oznaka unosa topline
A		6	5,4	5,6	4,9	6,5	5,68	Q ₁
B	korijen zavora (B1)	4	4,2	6	3,55	3	4,15	Q ₂
	2. prolaz zavora (B2)	5,2	6,2	5,9	5,8	4,5	5,52	Q ₃
C		4,3	5,3	5	4,5	5,7	4,96	Q ₄
D	korijen zavora (D1)	10,6	8	9,5	11	10	9,82	Q ₅
	2. prolaz zavora (D2)	9,7	7,5	8,5	7,8	11,5	9	Q ₆



Slika 36. Grafički prikaz udjela ferita u zonama zavora



Slika 37. Grafički prikaz sadržaja ferita za pojedinog stanja pokusa

Postoji razlika unosa topline Q_2 i Q_5 korijena zavora uzoraka B i D radi manje jakosti struje što je utjecalo na dobivanje manje širine zavora kod uzorka D te time i veći sadržaj ferita u tom dijelu zavora. Količina unosa topline za drugi prolaza zavora kod uzorka D i B je podjednaka, a sadržaj ferita različit. Unos topline jednaki je zbog jednakih parametara zavarivanje drugog prolaza zavora, a sadržaj ferita je veći kod uzorka D zbog manje širine zavora. Sadržaj ferita kod uzorka A je malo veći, kao i unos topline zbog većih parametara zavarivanja.

6 ZAKLJUČAK

Upotreba raznorodnih spojeva svake je godine u usponu, a samim time i znanje o raznorodnim spojevima raste. Za dobivanje kvalitetnog raznorodnog spoja bitan je dodatni materijali koji se uzima, parametri zavarivanja, no također je važno kvalitetno miješanje osnovnog materijala s dodatnim.

Upotreba praškom punjenih žica kod zavarivanja raznorodnih čelika ima prednosti u odnosu na pune žice. Navedene žice omogućuju veći unos topline koji nam je vrlo bitan kod raznorodnih čelika zbog dobivanja što boljeg miješanja osnovnih materijala s dodatnim. Postoji više vrsta praškom punjenih žica, ali za raznorodne čelike su najbolje žice punjene metalnim praškom. One omogućavaju lagani utjecaj na sastav metala zvara, nije potrebno odstranjivati trosku te se postupak može automatizirati, zbog sastava se smanjuje površinska napetost i penetracija. Nedostatak navedenih žica je visoka cijena te se izrađuju samo prema narudžbi. Ako proizvodnja zahtjeva manju količinu zavarivanja raznorodnih čelika, upotrebljavaju se žice punjene rutilnim praškom koje također osiguravaju veći unos topline, veću penetraciju, mogućnost zavarivanja u svim položajima te ostalo, ali je postupak teže automatizirati zbog nastanka troske.

U eksperimentalnom dijelu nerazornim ispitivanjem uzoraka penetrantima vidljivo je da nema pukotina, ali je došlo do nekoliko manjih indikacija koje su premale te se ne uzimaju u obzir. Rendgenskim ispitivanjem je utvrđeno da nije došlo do pojave pora, hladnih ili toplih pukotina, no pojavilo se nekoliko uključaka na uzorku zavarenom C1 zaštitnim plinom te je zbog različitih parametara zavarivanja došlo do manje širine zvara uzorka D u odnosu na uzorak B. Kod statičkog vlačnog pokusa na svim epruvetama zabilježeno je pucanje u osnovnom materijalu S355J2+N što je dokaz da su zavari zadovoljavajuće vlačne čvrstoće te kod savijanja nije došlo do pukotina pa se može reći da su zavari kvalitetno izvedeni.

Makroanalizom kod kutnih spojeva uočeno je nešto bolje miješanje u metalu zavara kod uzorka A zavarenog C1 zaštitnim plinom te se takve zasluge mogu pripisati zaštitnom plinu C1 koji omogućava veći unos topline zbog svojih svojstava. Također je došlo do zadovoljavajućeg miješanja osnovnog i dodatnog materijala kod uzoraka sučeljenog spoja, ali zbog manje jakosti struje kod uzorka D dolazi do manje širine zavara s obzirom na širinu zavara uzorka B. U metalu zavara kod uzorka B zavarivanog zaštitnim plinom C1 došlo je do veće količine uključaka u metalu zavara s obzirom na uzorak D zavaren M21 zaštitnim plinom te je linija staljivanja na strani osnovnog materijala S355J2+N jasnije definirana od linije staljivanja na strani osnovnog materijala 1.4301. Nema velikih razlika u sadržaju ferita kod kutnih spojeva, ali ima kod uzoraka sučeljenih spojeva zbog manje širine zavara uzorka D te time i manjom količinom austenitnog dodatnog materijala u metalu zavara.

Preporuka zaštitnog plina za dodatni materijal s rutilnim praškom je M21, jer osigurava zadovoljavajuće miješanje u metalu zavara kao i manje količine uključaka.

7 LITERATURA

- [1]. Lukačević, Z.: Zavarivanje, Strojarski fakultet Slavonski Brod, Slavonski Brod, 1998.
- [2]. Gojić, M.: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Metalurški fakultet, Sisak, 2003.
- [3]. Juraga, I.: Zavarivanje čelika otpornih na koroziju: Znanstveno-stručni časopis Zavarivanje 37, Zagreb, 1994., 1/2, str. 3-11
- [4]. Stawowy, H.: Produkcja nierzędnych celi – stanje i rozwój u technologii i gospodarstwie: Znanstveno-stručni časopis Zavarivanje 39, 1996., 3/4, str. 73-79
- [5]. Schiller, B.; Kekić, M.: Atestacija postupaka zavarivanja visokolegiranih korozijskih postojanih celi: Znanstveno-stručni časopis Zavarivanje 44, 2001., 1/2, str. 23-26
- [6]. Juraga, I., et al.: Zavarivanje visokolegiranih celi - zbornik radova,
- [7]. Kožuh, S.: Specijalni celi – skripta, Metalurški fakultet, Sisak, 2010.
- [8]. Samardžić, I.; Kolumbić, Z.; Baotić, M.: Doprinos primjeni praškom punjenih žica za zavarivanje MAG postupkom, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu; <http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/tocka6/tehn.vjes.pdf>, 15.03.2016.
- [9]. „Advantages and disadvantages of Metal Cored Wires“, <http://www.esabna.com/us/en/education/blog/advantages-and-disadvantages-of-metal-cored-wires.cfm>, 25.03.2016.
- [10]. Tušek, J.: Punjene žice: Znanstveno-stručni časopis Zavarivanje 37, 1994., 3/4, str. 87-94
- [11]. Winkler, F.: Primjena suvremenih praškom punjenih žica za navarivanje površina podvrgnutih trošenju u: Znanstveno-stručni časopis Zavarivanje 31, 1988, 5-6
- [12]. American Welding Society: Welding handbook - volume 2, American welding Society, 1991.
- [13]. Despotović, B.; Brechelmacher, B.; Marsenić, T.: Neka gledišta u primjeni punjenih žica za MAG postupak zavarivanja u: Znanstveno-stručni časopis Zavarivanje 42. 1999., 1-2, str. 25-29
- [14]. „Zavarljivost raznovrsnih celi i primjena Schaeffler – ovog dijagrama“, <https://bib.irb.hr/datoteka/535201.233-243-sbz2011.pdf>, 21.05.2014.
- [15]. Jakšić, S.: O zavarivanju raznorodnih celi s osvrtom na primjenu u kotlogradnji u: Znanstveno-stručni časopis Zavarivanje br. 1, 1969., str. 2-11

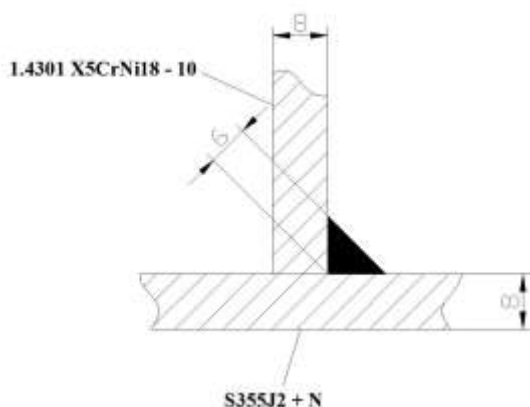
- [16]. „Zavarivanje raznorodnih materijala u izradi kompenzatora“, Slavonski Brod, 2011., <http://bib.irb.hr/datoteka/556582.271-279-sbz2011.pdf>, 21.05.2014.
- [17]. „Povoljne i nepovoljne karakteristike raznorodnih zavarenih spojeva čelika X10CrMoVNb91“, <http://www.e2012.drustvo-termicara.com/papers/download/101>, 22.05.2014.
- [18]. Mezga, V.: Problematika zavarivanja raznorodnih čelika, Diplomski rad, Zagreb, FSB, 2009.
- [19]. Čimić T.: Zavarivanje raznorodnih čelika: Znanstveno-stručni časopis Zavarivanje 24, 1981., 5, 257–265
- [20]. Ferit u zavaru, Schaefflerov dijagram, WRC 1992 Constitution dijagram“, <http://www.treatrade.hr/pdf/DM/A6.pdf>, 04.09.2014
- [21]. Begović B.: Difuzioni procesi u zavarenim spojevima raznorodnih čelika: Znanstveno-stručni časopis Zavarivanje 19, 1976., 10-11, 263–267
- [22]. Konjatić, P.: Analize tehnološkičnosti zavarenih konstrukcija, Diplomski rad, Slavonski Brod, 2001.
- [23]. Tehnička knjižica izvora struje ESS E4-4200
- [24]. Certifikat materijala čelika S355J2 + N prema EN 10204:2004
- [25]. Certifikat materijala čelika 1.4301 X5CrNi 18-10
- [26]. Certifikat dodatnog materijala prema EN 10204-3.1
- [27]. Norma HRN EN ISO 15614-1
- [28]. Norma HRN EN ISO 5173:2010

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. WPS - Welding procedure specification
- III. Certifikati osnovnih i dodatnog materijala

Supporting PQR No's Atest postupka broj	0	Base metals Osnovni materijal			
Welding Process Postupak zavarivanja	FCAW (136)	Mark Oznaka	Group Grupa	Thickness (mm) Debljina (mm)	Diameter (mm) Promjer (mm)
Welding position Položaj zavarivanja	Horizontal (PB) Horizontalan (PB)	W.Nr. 1.4301	8.1	8	/
Joint type Vrsta spoja	Fillet weld (FW) Kutni spoj	S355J2+N	1.2	8	/

Joint Design/Oblik spoja



* u jednom prolazu

Welding parameters
Parametri zavarivanja

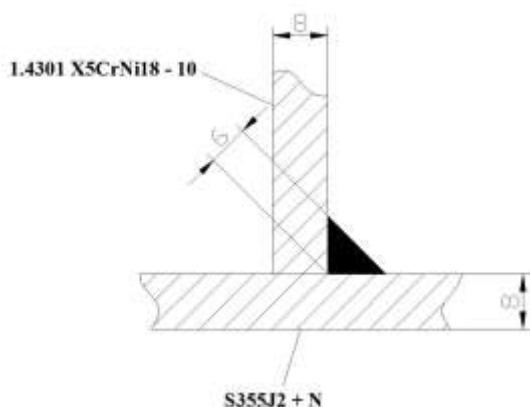
Pass No. Prolaz br.	Process Postupak	Size of filler Promjer DM (mm)	Current Jakost struje (A)	Voltage Napon (V)	Type/polarity Vrsta/polaritet	Gas flow rate Protok plina (l/min)	Travel speed Brzina zavarivanja (cm/min)	Wire speed Brzina zice (m/min)	Heat input Unos topline (KJ/cm)
1	136	1,2	230-250	28-30	DC (+)	15	18-20	9,2-9,8	18,2-22,5

Filler metal Dodatni materijal			Postweld heat treatment Toplinska obrada poslije zavarivanja	
Designation and manufacturer Naziv i proizvođač	Boehler CN 23/12-FD		Preheat temperature Temperatura predgrijavanja	
Classification Klasifikacija	T23 12 L R M (C) 3		Interpass temperature Medjuslojna temperatura	
Coat type / Tip obloge			Max. layer width Max. širina-njihanje	
Flux composition Sastav praha	Rutilni		Initial and interpass cleaning Početno i međuslojno čišćenje	
Size and type W-electrode Promjer i vrsta W elektrode			Other/Ostalo	
Shielding gas/Backing gas Zaštitni plin/Zaštita korijena	M21			

Prepared by Izradio	Karlo Zidarić	Approved by Odobrio	Marko Dovečar, IWE	Revisions Revizija
Date/Datum	15.04.2016	Date/Datum	15.04.2016	

Supporting PQR No's Atest postupka broj	0	Base metals Osnovni materijal			
Welding Process Postupak zavarivanja	FCAW (136)	Mark Oznaka	Group Grupa	Thickness (mm) Debljina (mm)	Diameter (mm) Promjer (mm)
Welding position Položaj zavarivanja	Horizontal (PB) Horizontalan (PB)	W.Nr. 1.4301	8.1	8	/
Joint type Vrsta spoja	Fillet weld (FW) Kutni spoj	S355J2+N	1.2	8	/

Joint Design/Oblik spoja



* u jednom prolazu

Welding parameters Parametri zavarivanja

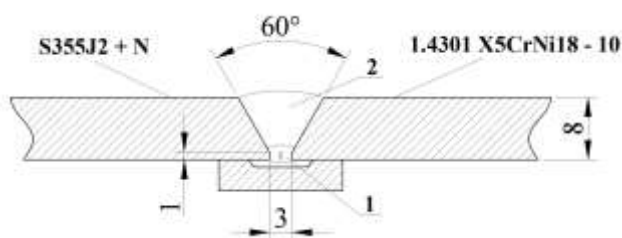
Pass No. Prolaz br.	Process Postupak	Size of filler Promjer DM (mm)	Current Jakost struje (A)	Voltage Napon (V)	Type/polarity Vrsta/polaritet	Gas flow rate Protok plina (l/min)	Travel speed Brzina zavarivanja (cm/min)	Wire speed Brzina zice (m/min)	Heat input Unos topline (KJ/cm)
1	136	1,2	235-255	28-30	DC (+)	15	18-20	9,2-9,8	18,6-19,5

Filler metal Dodatni materijal			Postweld heat treatment Toplinska obrada poslije zavarivanja	
Designation and manufacturer Naziv i proizvođač	Boehler CN 23/12-FD		Preheat temperature Temperatura predgrijavanja	
Classification Klasifikacija	T23 12 L R M (C) 3		Interpass temperature Medjuslojna temperatura	
Coat type / Tip obloge			Max. layer width Max. širina-njihanje	
Flux composition Sastav praha	Rutilni		Initial and interpass cleaning Početno i međuslojno čišćenje	
Size and type W-electrode Promjer i vrsta W elektrode			Other/Ostalo	
Shielding gas/Backing gas Zaštitni plin/Zaštita korijena	C1			

Prepared by Izradio	Karlo Zidarić	Approved by Odobrio	Marko Dovečar, IWE	Revisions Revizija
Date/Datum	15.04.2016	Date/Datum	15.04.2016	

Supporting PQR No's Atest postupka broj	0	Base metals Osnovni materijal			
Welding Process Postupak zavarivanja	FCAW (136)	Mark Oznaka	Group Grupa	Thickness (mm) Debljina (mm)	Diameter (mm) Promjer (mm)
Welding position Položaj zavarivanja	Horizontal (PA) Horizontalan (PA)	S355J2+N	1.2	8	
Joint type Vrsta spoja	Butt weld (BW) Sučeljeni spoj	W.Nr. 1.4301	8.1	8	

Joint Design/Oblik spoja



Welding parameters Parametri zavarivanja

Pass No. Prolaz br.	Process Postupak	Size of filler Promjer DM (mm)	Current Jakost struje (A)	Voltage Napon (V)	Type/polarity Vrsta/polaritet	Gas flow rate Protok plina (l/min)	Travel speed Brzina zavarivanja (cm/min)	Wire speed Brzina zice (m/min)	Heat input Unos topline (KJ/cm)
1	136	1,2	200-210	20-22	DC(+)	15	23-25	8,8-9,2	8,9-11,1
2	136	1,2	220-230	28-30	DC(+)	15	22-24	8,8-9,2	14,3-17,3

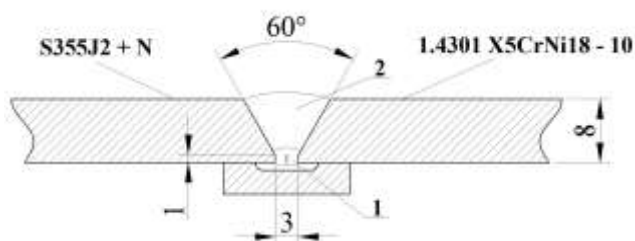
Filler metal Dodatni materijal

Designation and manufacturer Naziv i proizvođač	Boehler CN 23/12-FD	Postweld heat treatment Toplinska obrada poslije zavarivanja	
Clasification Klasifikacija	T23 12 L R M (C) 3	Preheat temperature Temperatura predgrijavanja	
Coat type / Tip obloge		Interpass temperature Medjuslojna temperatura	
Flux composition Sastav praha	Rutilni	Max. layer width Max. širina-njihanje	
Size and type W-electrode Promjer i vrsta W elektrode		Initial and interpass cleaning Početno i međuslojno čišćenje	Aceton, brušenje, četkanje
Shielding gas/Backing gas Zaštitni plin/Zaštita korijena	M21	Other/Ostalo	Korištena je keramička podloga

Prepared by Izradio	Karlo Zidarić	Approved by Odobrio	Marko Dovečar, IWE	Revisions Revizija
Date/Datum	15.04.2016.	Date/Datum	15.04.2016.	

Supporting PQR No's Atest postupka broj	0	Base metals Osnovni materijal			
Welding Process Postupak zavarivanja	FCAW (136)	Mark Oznaka	Group Grupa	Thickness (mm) Debljina (mm)	Diameter (mm) Promjer (mm)
Welding position Položaj zavarivanja	Horizontal (PA) Horizontalan (PA)	S355J2+N	1.2	8	/
Joint type Vrsta spoja	Butt weld (BW) Sučeljeni spoj	W.Nr 1.4301	8.1	8	/

Joint Design/Oblik spoja



Welding parameters Parametri zavarivanja


Pass No. Prolaz br.	Process Postupak	Size of filler Promjer DM (mm)	Current Jakost struje (A)	Voltage Napon (V)	Type/polarity Vrsta/polaritet	Gas flow rate Protok plina (l/min)	Travel speed Brzina zavarivanja (cm/min)	Wire speed Brzina zice (m/min)	Heat input Unos topline (KJ/cm)
1	136	1,2	210-220	20-22	DC (+)	15	23-25	8,7-8,9	9,3-9,9
2	136	1,2	220-230	27-29	DC (+)	15	23-25	8,9-9,2	13,1-13,6

Filler metal Dodatni materijal

Designation and manufacturer Naziv i proizvođač	Boehler CN 23/12-FD	Postweld heat treatment Toplinska obrada poslije zavarivanja	
Clasification Klasifikacija	T23 12 L R M (C) 3	Preheat temperature Temperatura predgrijavanja	
Coat type / Tip obloge		Interpass temperature Medjuslojna temperatura	
Flux composition Sastav praha	Rutilni	Max. layer width Max. širina-njihanje	
Size and type W-electrode Promjer i vrsta W elektrode		Initial and interpass cleaning Početno i međuslojno čišćenje	Aceton, brušenje, četkanje
Shielding gas/Backing gas Zaštitni plin/Zaštita korijena	C1	Other/Ostalo	Korištena je keramička podloga

Prepared by Izradio	Karlo Zidarić	Approved by Odobrio	Marko Dovečar, IWE	Revisions Revizija
Date/Datum	15.04.2016	Date/Datum	15.04.2016	

CERTIFICATO DI CONTROLLO 3.1 / INSPECTION CERTIFICATE 3.1 - EN 10204:2004

A04/A05	<div><div><div>METINVEST®</div><div>Ferriere Valxider SpA</div></div></div>	<div>(A) PROCESSO DI ELABORAZIONE / STEELMAKING PROCESS: E = ELECTRIC ; BO = BASIC OXYGEN (B) STATO DI FORNITURA / DELIVERY CONDITION: AR = GREZZO DI LAMINAZIONE / AS ROLLED ; N* = LAMINAZIONE A TEMPERATURA CONTROLLATA / NORMALIZING ROLLING ; N = NORMALIZZATO / NORMALIZED at 910°C, 1,5 min/mm ; ARIA CALMA / STILL AIR; R = RICOTTO / ANNEALED; N+R = NORMALIZZATO + RINVENUTO / NORMALIZED + ANNEALED (C) TRATTAMENTO TERMICO DEL CAMPIONE / HEAT TREATMENT OF SAMPLE: N = 910°C, 1,5 min/mm ; ARIA CALMA / STILL AIR R = 650°C, 1,5 min/mm ; ARIA CALMA / STILL AIR (D) Ceq_1 = C + Mn/6 ; Ceq_2 = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15 ; Pcm = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + B*5 (1) POSIZIONE / LOCATION: 1 = TESTA / TOP ; 2 = PIEDE / BOTTOM (2) POSIZIONE / LOCATION: C = CUORE / 1/2 THICKNESS ; P = PELLE / SURFACE ; D = 1/4 SPESSORE / THICKNESS (3) DIREZIONE / DIRECTION: L = LONGITUDINALE / LONGITUDINAL ; T = TRASVERSALE / TRANSVERSE (4) FORMA DEL PROVINO / SHAPE OF TEST PIECE: P = PRISMATICO / PRISMATIC ; C = CILINDRICO / CYLINDRICAL (5) ESITO PROVA DI PIEGA / RESULT: OK = COMPLYING ; NO = NOT COMPLYING</div>
A01	<div>Società soggetta a direzione e coordinamento di Metinvest B.V. STABILIMENTO: Via A. Salieri 36 – 37050 Vallesse di Oppeano (VR) TEL. 045/7133311 (RIC. AUT.) - FAX 045/7133394 (RIC. AUT.) P.IVA: 03067420236 - C.F. e Reg. Imprese n.13120560159</div>	

A03	N° Certificato / Certificate no.	A02	Data / Date	A06	Cliente / Customer
	21		20/01/2014		
A06	N° Ordine Trametal / Works order	A07	N° Ordine cliente / Customer's order		
	95134167		FG15400006186		
	DDT		del / date		
	BOL 1400720		17/01/2014		
	Pratica / File no.			A06	THYSSENKRUPP FERROGLOBUS Korvarsut sor. 110 H-115 BUDAPEST Hungary
	del / date				
B01/B02/B03	Prodotto / Product		Lamiere / Hot rolled plates		
	Qualità / Steel grade		S355J2+N		
	Normativa / Specification		EN 10025-2:2004		
				B06	Marcatura di prodotto / Marking of the product
				LAMIERA/ORDINE/N° INFORMAMENTO/DIMENSIONI/QUALITÀ/MARCHIO DEL PRODUTTORE PLATE/ORDER/INTERNAL N°/DIMENSIONS/STEEL GRADE/MANUFACTURER'S MARK	


B07		B16	B09/B11	B12	B07	C70	B04	C00	B05	C00	B05 PWHT					C00	B05 Q+T						
ITEM		COLATA HEAT	DIMENSIONI [mm] DIMENSIONS	PESO TEORICO [t] THEORETICAL WEIGHT	LOTTO BATCH NO.	PROCESSO ELAB. (A) STEELMAKING PROCESS	STATO FORNITURA LAMIERA (B) DELIVERY CONDITION	CAMPIONE SAMPLE	TRATT. CAMPIONE (C) HEAT TREATMENT	CAMPIONE PWHT SAMPLE	N° CICLI / CYCLES	TEMPERATURA FINE °C END TEMPERATURE	VELOCITÀ RAFFREDDAMENTO °C/h COOLING RATE	PERMANENZA Min HOLDING TIME	TEMPERATURA TRATTAMENTO °C TEMPERATURE TREATMENT	VELOCITÀ RISCALDO C/h HEATING RATE	TEMPERATURA INIZIO °C BEGINNING TEMPERATURE	CAMPIONE Q+T SAMPLE	PERMANENZA (Q) Min HOLDING TIME	TEMPERATURA (Q) °C TEMPERATURE	PERMANENZA (T) Min HOLDING TIME	TEMPERATURA (T) °C TEMPERATURE	RAFFREDDAMENTO COOLING
6	CL13/26947A	A1/02311570	8.00X1500X0	24,95	90013972	BO	N*	[ZB860]															


C71/C92 COMPOSIZIONE CHIMICA DI COLATA / HEAT CHEMICAL ANALYSIS																					
B07	C71	C72	C73	C74	C75	C76	C77	C78	C79	C80	C81	C82	C83	C84	C85	C86	C87	C88	C89	C90	C91
COLATA HEAT	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Al	V	Nb	Ti	Sn	Ca	N	B	H	Ceq1	Ceq2	Pcm
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	% (D)	% (D)	% (D)
Ordine Min 6	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,0000	0,0000	0,0000	0,00	0,00	0,00
Ordine Max 6	0,00	0,00	0,03	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,0000	0,0000	0,0000	0,00	0,00	0,00
S355J2+N Min										0,020											
S355J2+N Max	0,20	1,60	0,55	0,025	0,025	0,550															
A1/02311570	0,17	1,41	0,02	0,013	0,007	0,040	0,090	0,060	0,01	0,031	0,005	0,005	0,005	0,000	0,0000	0,0080	0,0005	0,0005	0,41	0,43	0,25




PROVA DI TRAZIONE TENSILE TEST										PROVA DI RESILIENZA IMPACT TEST - CHARPY V-NOTCH TEST					PROVA DI PIEGA BEND TEST					PROVA DI DUREZZA HARDNESS TEST				PROVA DI STRIZIONE Z% TEST	
C00	C01	C02	C03	C11	C12	C13	C14	C10	C41	C02	C03	C42	C01	C42	C43	C02	C51	C52	C50	C01	C30	C31	C32	C53	C54
CAMPIONE SAMPLE	POSIZIONE (1) LOCATION	POSIZIONE (2) LOCATION	DIREZIONE (3) ORIENTATION	TEMPERATURA [°C] TEST TEMPERATURE	YIELD STRENGTH ReH [Mpa]	TENSILE STRENGTH Rm [Mpa]	ELONGATION A%	PROOF STRENGTH Rp 0.2 [Mpa]	FORMA PROVINO (4) SHAPE OF TEST PIECE	DIREZIONE (3) ORIENTATION	TEMPERATURA [°C] TEST TEMPERATURE	POSIZIONE (2) LOCATION	INDIVIDUAL VALUES [J]	MEAN VALUE [J]	DIREZIONE (3) ORIENTATION	ESITO (5) RESULT	MANDREL [mm]	MANDRINO [mm]	ANGOLO [°] ANGLE	POSIZIONE (2) LOCATION	METODO TEST METHOD	SINGOLI VALORI INDIVIDUAL VALUES	MEAN VALUE	2% SINGOLI VALORI 2% INDIVIDUAL VALUES	2% VALORE MEDIO 2% MEAN VALUE
S355J2+N Min 3.00 - 16.00							0,0			L	-20		27	0											
S355J2+N Min 3.00 - 16.00				20	355	470	0,00	20,0																	
S355J2+N Max 3.00 - 16.00				20	0	630	0,00	0,0																	
ZB860	8,00	2	P	T	20	364	542	0,67	25,0	P	7,50	L	-20	P	179 191 111	160									

UNI EN ISO 6892-1:2009 / UNI EN ISO 148-1:2011

Z01						
ITEM		TOLLERANZA DI SPESSORE TOLERANCE ON THICKNESS	TOLLERANZE DI LARGHEZZA TOLERANCE ON WIDTH	TOLLERANZE DI LUNGHEZZA TOLERANCE ON LENGTH	CONDIZIONI SUPERFICIALI SURFACE FINISH	PLANARITÀ FLATNESS
6		-0.35/0	EN 10051	EN 10051 -0/+30	EN 10163/2 CL A1	EN 10051
CERTIFICHIAMO che le lamiere elencate sono conformi alla prescrizione dell'ordine, che i controlli della marcatura, dell'aspetto superficiale e dimensionale hanno dato esito positivo. WE CERTIFY that the above mentioned plates are consistent with the order prescriptions: marking, inspection and measurement without objection. DICHIARIAMO CHE LE LAMIERE SONO STATE CONTROLLATE IN ACCORDO ALLA NORMATIVA VIGENTE E CHE LE RADIAZIONI IONIZZANTI NON ECCEDONO IL VALORE DEL FONDO NATURALE. WE DECLARE THAT THE PLATES WERE CONTROLLED ACCORDING TO STANDARD AND RADIATION DO NOT EXCEED THE NATURAL RADIATION.						

Z06		
Z07	Z03 ENTE COLLAUDO / INSPECTION BODY	Z02
	TIMBRO DELL'ISPETTORE STAMP OF THE INSPECTION REPRESENTATIVE	

Z04	
	Lamiere conformi ai requisiti della marcatura CE. Certificato di conformità CE n° 0948-CPD-0015 rev.5 emesso da TÜV Italia srl . Plates in compliance with CE marking requirements. Certificate of conformity N° 0948-CPD-0015 rev.5 from TÜV Italia srl.

 <p>Correspondentieadres: Aperam Genk Swinnenwijerweg 5, Poort Genk 7523 3600 Genk, Belgium Tel. +32 (0)89 30 21 11</p>		MILL CERTIFICATE BS EN 10204/3.1 CERTIFICAT DE RECEPTION NF EN 10204/3.1 ABNAHMEPRUEFZEUGNIS DIN EN 10204/3.1										N-Nr-N 15K0041656-01 V01																					
		<p>Certified acc.PED 97/23/EC Annex I § 4.3 by Certification Body 0036 of TUV SUD Industrie Service GmbH with cert.No.:314/2007/MUC.Renounced of counter signature agreed byTÜV SÜD (9/5/2007).Approved acc.AD 2000-Merkblatt W0/TRD 100 by TÜV SÜD Industrie Service GmbH.Confirmation letter from TÜVSÜD Industrie Service GmbH of 07/05/2010 about the uniformity of coils acc.AD2000 W2 §4.1.1</p>																															
Manufacturer's works order number N° de la commande usine productrice Werksauftragsnummer 80264732/03-08836/127/03		Surveyor's mark Cachet de l'expert Stempel des Werkssachverstaendigen 		Purchaser and/or consignee Client et/ou destinataire Besteller und/oder Empfaenger NOVA TRADING S.A. UL.STAROTORUNSKA 5 87-100 TORUN POLAND						Purchaser's order number N° de commande client Kundenbestellnummer S/100076/062/2015																							
Product - Produit - Erzeugnis COILS, HOT ROLLED, ANNEALED AND PICKLED COILS, LAMINE A CHAUD, RECUITS + DECAPE COILS, WARMGEWALZT, GEGLUEHT UND GEBEIZT				Product delivery condition Etat de livraison du produit - Lieferzustand Solution treated: Hypertrempe: 1050 °C Loesungsgegl+abgeschreckt:						Customer article number N.article client Artikelnummer des Kunden																							
Steel designation Désignation de l'acier Stahlbezeichnung EN 10028-7-2008 1.4307 / 1.4301 EN 10088-2-2014 1.4307 / 1.4301 ASTM A 240-2015 TYPE 304L / 304 ASME SA 240-2013 TYPE 304L / 304		Finish Présentation Ausfuehrung 1D 1D NO 1 NO 1		Steelmaking process Mode d'élaboration de l'acier - Stahlherstellungverfahren Prod.proces: Electric arc furnace - VOD/AOD - Continuous casting Proc.fabric.: Four à arc - VOD/AOD - Coulée continue Fertigungsablauf: Elektro-Ofen - VOD/AOD - Stranggussanlage						Forced air-water/air forcé-eau Geblaese Luft-Wasser																							
NACE MR 0175 / ISO 15156-1 / ISO 15156-3 -- NACE MR 0103 // DIMENSION AND SHAPE TOLERANCES ACC. TO EN ISO 9444-2																																	
Identification of the product Identification du produit - Identifizierung des Erzeugnisses MELTED IN BELGIUM, MADE IN BELGIUM		Dimensions Dimensions - Abmessungen Thickness Epaisseur - Staerke 8.00 mm						Width Largeur - Breite 1000.00 mm		Length Longueur - Laenge		Number of pieces Nb de pièces - Stueckzahl 1																					
Coil n. N.Bobine - Band Nr. 52506528		Heat n. N.Coulée - Schmelz Nr. 525065								Net weight Poids net - netto Gewicht 9990 KG																							
CHEMICAL ANALYSIS - ANALYSE CHIMIQUE - CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG																																	
		C		Si		Mn		Ni		Cr		Mo		Ti		N		S		P													
Required -Exigé %mini Anforderung. %maxi		0.030		0.75		2.00		8.00 10.50		17.50 19.50						0.100		0.015		0.045													
Cast Analysis Analyse coulee Analyse Schmelze		0.027		0.44		1.43		8.00		18.02						0.070		0.004		0.030													
		C71		C72		C73		C74		C75		C76		C77		C78		C79		C80		C81		C82		C83		C84		C85		C86	
Positive material identification carried out : OK Tests de vérification de la conformité de la nuance fournie : OK Verwechslungspruefung wurde durchgefuehrt : OK														D52																			
Location (1)														MECHANICAL PROPERTIES - PROPRIETES MECANQUES - MECHANISCHE WERTE EN ISO 6892-1 B																			
Room temperature - Température ambiante - Raumtemperatur														Test temperature (°C) :																			
Direction (2)		Yield or proof strength Limite d'élasticité Dehngrenze MPa				Tensile Strength Résistance à la traction Zugfestigkeit MPa				Elongation after fracture Allongement après rupt. Bruchdehnung %		Hardness Dureté Haerte		Yield or proof strength Limite d'élasticité Dehngrenze MPa				Tensile str. Résist. MPa Zugfestigkeit		Elongation % Allongement. Bruchdehnung													
		Rp0.2%				Rp1%				Rm		A5		50mm		HRB C30		Rp0.2%		Rp1%		Rm		A5									
		210				250				520 700		45		45		92																	
1 T		Obtained Obtenu Ergebnisse				324				351				631		55		57		86													
		C11				C14				C12		C13		C15		C31		C16		C17		C18		C19									
Impact strength test Essai de résilience Kerbschlagzaehigkeitstest				Corrosion test Test de corrosion Korrosionstest				E0.2(T)/R(T) %																									
C40 t(°c) C44				EN ISO 3651/2 - A:OK				51		C50		C51		C52		C53		C54		C55		C05											
C42				D51				Internal cleanliness:		A:		B:		C:		D:		C57															
Location of the sample (1) Emplacement de l'échantillon Lage des Probenabschnittes 1. Front - Début - Anfang 2. Back - Fin - Ende 3. Middle - Milieu - Mitte				The delivery is in accordance with the order La fourniture est conforme aux exigences de la commande Die lieferung entspricht den Bestellbedingungen				Packing list Avis d'expédition LieferscheinNummer 2015046705-8836		Organisation inspection Organisme et/ou service contrôle Ueberwachungsabteilung Quality Department 8/9/2015 The inspector Le responsable Der Werkssachverstaendige  D. Raemaekers																							
Direction of the test pieces (2) Orientation des éprouvettes Probenrichtung T. Transverse - Travers - Quer L. Longitudinal - Long - Laengs				Marking, inspection and measurement : without objection Contrôle de marquage, d'aspect et de dimensions : satisfaisants Pruefung der Stempelung, des Oberflaechenaspekts und der Abmessungen : ohne Beanstandung				D01																									

Zultner Metall GmbH

Schmiedlstrasse 7
8042 Graz-Messendorf
Österreich

Abnahmeprüfzeugnis 3.1**Inspection certificate 3.1**

nach / as per : EN 10204

Nr. No. : 2016-2092008713-900001-014

Rev. 0

Seite / Page : 1 / 1

Bestell-Nr.	PO no.	G01-BA1086825 Fr.Rodakovic	vom / of 05.04.2016
Auftrags-Nr.	Order no.	1092006842	
Lieferschein/Pos./Splitt	Delivery note/pos./splitt	2092008713/000010/900001	vom / of 05.04.2016
Produkt	Product	Fülldraht / flux cored wire	100000
Handelsname	Trade name	BOEHLER CN 23/12-FD	36050
Normbezeichnung	Standard designation	EN ISO 17633-A: T 23 12 L R M (C) 3	2SE6A01F
		AWS A5.22: E309LT0-4(1)	0325
Abmessung	Dimension	1,2 mm	
Serien-Nr.	Serial no.	2305812	
Liefermenge	Quantity	270,0 KG	

Chemische Analyse in % des reinen Schweißgutes

Chemical composition in % of the weld metal

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu						
0,02	0,61	1,42	0,019	0,010	23,39	0,02	12,41	0,06						

Mechanische Gütewerte

Mechanical properties

EN 10204: 2.2

Zugversuch Probenvorbereitung		Tensile test Specimen preparation		nach / according to : EN ISO 6892-1/09 nach / according to : EN ISO 5178			
T	ReL / Rp 0,2 MPa	Rp 1,0 MPa	Rm MPa	A (Lo = 5d) %	Z %	WBH PWHT	Bemerkung Remarks
20°C	≥ 350		≥ 520	≥ 30			
Kerbschlagbiegeversuch Probenvorbereitung		Impact test Specimen preparation		nach / according to : EN ISO 148-1/10 nach / according to : EN ISO 9016 VWT 0/b			
T	Kerbschlagarbeit Impact energy KV / J	Mittelwert Average KV / J	Laterale Breitung Lateral expansion mm	Duktiler Bruchanteil Shear fracture %	WBH PWHT	Bemerkung Remarks	
-60°C	≥ 32						
20°C	≥ 45						

The product BOEHLER CN 23/12-FD meets the requirements of the filler metal specification ASME sec II, part C, AWS A5.22: E309LT0-4(1) when tested in accordance with that specification. Produced according to AWS A5.01, class T4

Ort / Town
Kapfenberg

Datum / Date
05.04.2016

Dieses Zeugnis wurde maschinell erstellt und gilt auch ohne Unterschrift.
This certificate was issued by DP-equipment and does not require signature.

Abnahmebeauftragter / Authorized representative
Gugimeier

voestalpine

ONE STEP AHEAD.